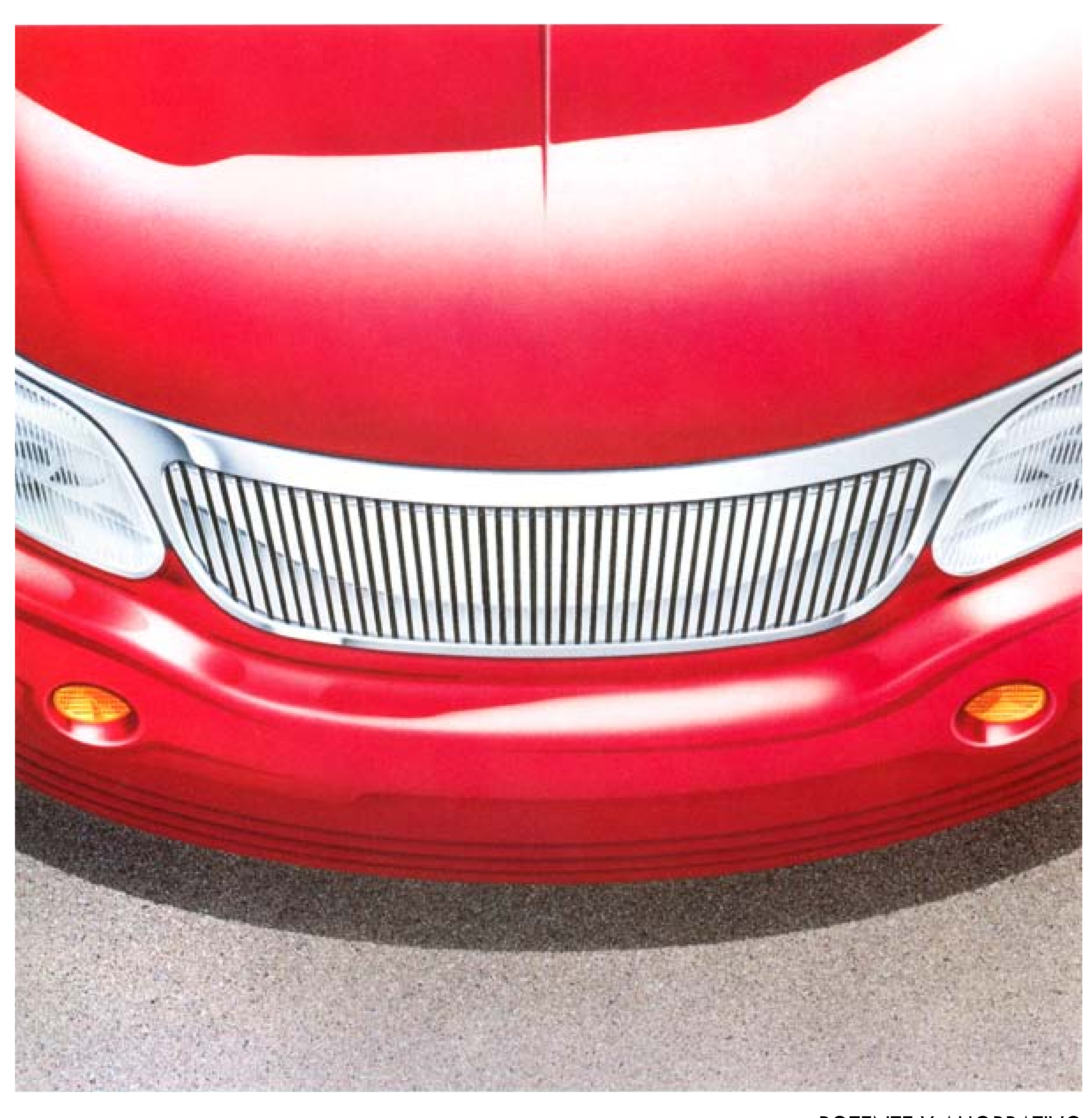
INVESTIGACION y CIENCIA

FOSILES DEL DESIERTO DE GOBI

MEDICINAS DE ADN

FUNDAMENTO ULTIMO DE LA FISICA

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



POTENTE Y AHORRATIVO

FEBRERO 1995
700 PTAS.



Febrero de 1995 Número 221

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN 150 YEARS OF INNOVATION

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *La Tierra vista desde el cielo*, *¿Muere la letra impresa?*, *Juegos matemáticos* y *Creaciones informáticas*; Santiago Torres: *Las nuevas medicinas genéticas*; Juan Pedro Campos: *La dualidad en la materia y en la luz*; Esther Pérez Asensio: *Fósiles de Flaming Cliffs*; Juan José de Castro: *Bases de la tipicidad de los vinos*; J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*.

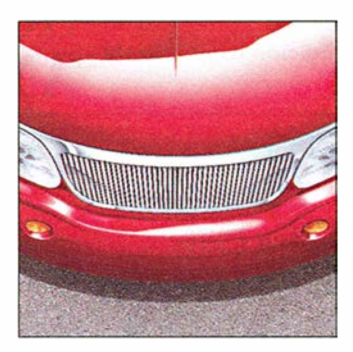
Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: George Retseck

Página	Fuente
11	Jared Schneidman/JSD (*arriba*), Andrew Christie (*abajo*)
12-13	George Retseck
14	Lisa Burnett
15	Camerique/H. A. Roberts
17-18	Manuel Becana
19	Cortesía de M. R. de Felipe
20-21	Manuel Becana
22	Cortesía de la Sociedad Americana de Fisiólogos Vegetales
23	Manuel Becana
24-29	Laboratorio de Propulsión a Chorro, Instituto Californiano de Tecnología y NASA
38-39	Tomo Narashima
40	Jared Schneidman/JSD
41	Sean R. Smith, Escuela Baylor de Medicina (*izquierda*), Sean R. Smith y Peter Samek (*derecha*)
42-43	Tomo Narashima
44	*Proceedings of the National Academy of Sciences*, cortesía de Alan M. Gewirtz, Universidad de Pennsylvania
46-47	Michael Crawford
48-51	Michael Goodman
54-55	Fred Conrad
56-57	Alfred T. Kamajian (*arriba*), Mark Norell/Museo Americano de Historia Natural; muestras preparadas por William Amarel (*inferior izquierda*) y Amy Davidson (*inferior derecha*)
58-59	Archivos Fotográficos AMNH (*izquierda*), Johnny Johnson (*derecha*)
60-61	Michael J. Novacek; muestras preparadas por William Amarel (*arriba*), Michael Ellison/AMNH (*inferior izquierda*), Ed Heck/AMNH (*inferior derecha*)
63-67	Documents Pour la Science
70-71	David Levenson/Black Star
72	Jared Schneidman/JSD
73	Corporación IBM, División de Investigación, Centro de Investigación Almaden
74	Steve Northup
75	Jared Schneidman/JSD
80-81	Kathy Konkle
84-91	Documents Pour la Science



El novísimo modelo de la portada subraya la importancia del fino ajuste y acabado para elevar el rendimiento de los coches. Las nuevas técnicas de pintura y soldadura por láser, junto con las redondeadas aristas y el bajo perfil del morro, ayudan a disminuir la resistencia al aire. La reducción de otras pérdidas, entre ellas las de frenado y rozamiento de neumáticos, ofrece un medio eficaz para potenciar el ahorro de combustible (véase "Hacia un mayor rendimiento del automóvil", por John DeCicco y Marc Ross, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Philip Morrison, *Book Editor*; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; Ricki L. Rusting; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	7.700	14.000
Extranjero	8.600	15.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 700 pesetas
Extraordinario: 900 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «"La industria ha comenzado a apreciar los servicios que pueden prestarle los laboratorios universitarios", afirmó recientemente el doctor Harvey A. Neville, de la Universidad de Lehigh. "Cada día se comprende mejor que ciertos tipos de investigación pueden llevarse a cabo con mayor eficacia en tales laboratorios, donde el ambiente académico, aislado del proceso productivo, facilita perspectivas más puras."»

«No hay que perder de vista al litio y sus aplicaciones industriales en el futuro inmediato. Pesando la quinta parte que el aluminio, el más liviano de todos los metales está compensando el esfuerzo de la investigación. Hoy, el litio y sus compuestos ya encuentran aplicaciones diversas en el moldeo del cobre, bronces de estaño y otras aleaciones, así como en las industrias de la cerámica, el vidrio y el aire acondicionado.»

«Las bases de espárragos, producto residual de la industria conservera, puede que encuentren una aplicación útil. Tres científicos han descubierto que el jugo que se obtiene al exprimirlas puede emplearse como caldo de cultivo para conseguir proteinasa bacteriana, una enzima que digiere las proteínas. La proteinasa bacteriana se usa en la elaboración de la cerveza y en las industrias peletera y textil.»

«Se ha conseguido una técnica fotográfica de tal sensibilidad, que podría hacer la foto de un fantasma si es que tales entes existieran. Este nuevo proceso, que emplea una iluminación con lámpara de destello con una exposición de una millonésima de segundo, fotografía cosas invisibles, tales como los más finos detalles de perturbaciones atmosféricas, y hasta el punto de sacar la imagen de la onda calórica que emerge de la mano de una persona.»

...cien años

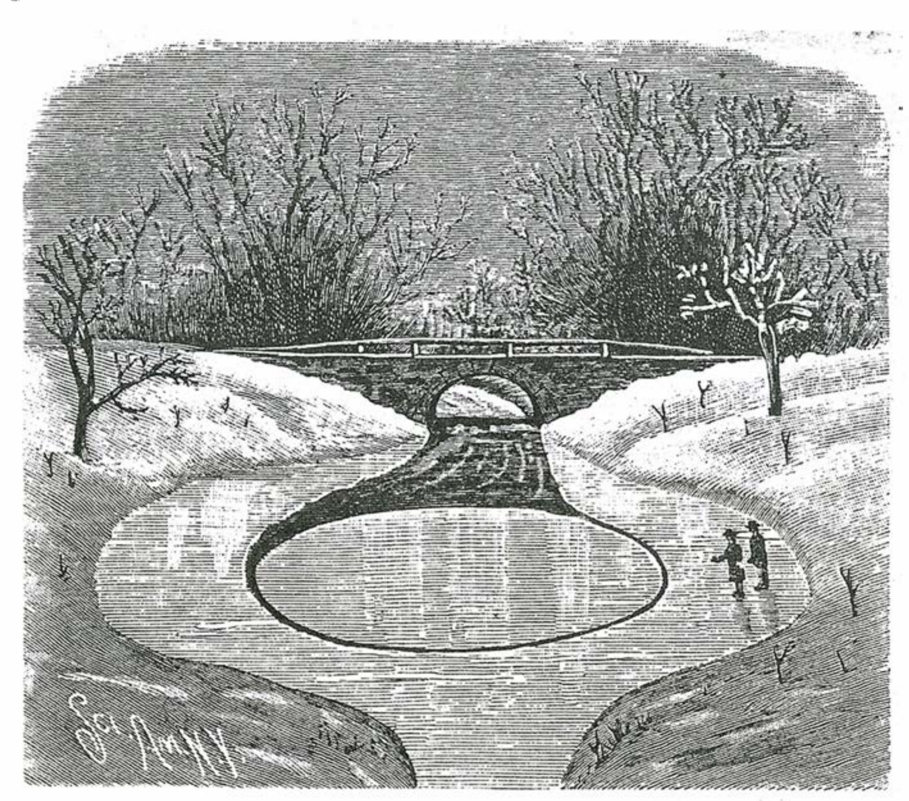
SCIENTIFIC AMERICAN: «Una caída de temperaturas tan drástica como la experimentada sobre la mayor parte de Estados Unidos, de la Montañas Rocosas al Atlántico, y de la frontera canadiense al golfo de México, durante la semana que acababa el nueve de febrero, apenas tiene paralelo desde que se inició el registro sistemático regular de los cambios climáticos. La temperatura se situó por debajo del punto de congelación durante casi tres días en todo el territorio de la Unión.»

«Si examinamos a fondo la química, apreciaremos que el deseo más hondo de los químicos fue la síntesis de hidrocarburos para emplearlos como combustibles. Parece que al fin la gran síntesis se ha alcanzado. Exponiendo una mezcla de cal y carbón de antracita a un arco eléctrico, se produce una pesada masa semimetálica. Si este material se sumerge en agua, se desprende acetileno, un hidrocarburo gaseoso.»

«En las puertas de entrada a unos de los almacenes de mercería más favorecidos por el público cuelgan unos arcos eléctricos para iluminación. Bajos esas luces entra y sale constantemente una multitud de señoras. La naturaleza inflamable del atavío femenino convierte en un riesgo el pasar o permanecer bajo luces de arco voltaico. La otra tarde observamos que una dama se salvó por un pelo al caerle encima chispas que justo le rozaron la ropa.»

«Actualmente el papel se fabrica de materiales tan ínfimos que no tarda en pudrirse y son pocos los libros publicados que tienen oportunidad de durar mucho tiempo. De este modo, los fabricantes de papel asumen sin querer las funciones de un gran censor literario de la época. Su crítica es especialmente destructiva y excesivamente severa. Sin el poder de una valoración selectiva, condena a la destrucción a buenos y malos juntos.»

«En un lugar del río Mianus, conocido localmente como la "hoya de los tres metros", la corriente se ensancha formando una balsa de unos doce a quince metros de ancho. En ella se ha formado una especie de tarta de hielo de un diámetro de siete a nueve metros y de forma perfectamente circular. La tarta, que se muestra en la ilustración, gira lentamente y en unos dos tercios de su perímetro está rodeada por hielo inmóvil. Entre éste y la tarta hay un espacio de unos ocho centímetros, salvo en la zona de corriente arriba, donde el agua está al aire y la corriente es muy rápida. Cada revolución dura unos seis minutos.»



Tarta de hielo rotatoria

Perfiles

Corey S. Powell

JEREMIAH y ALICIA OSTRIKER: *Matrimonio de la ciencia con el arte*

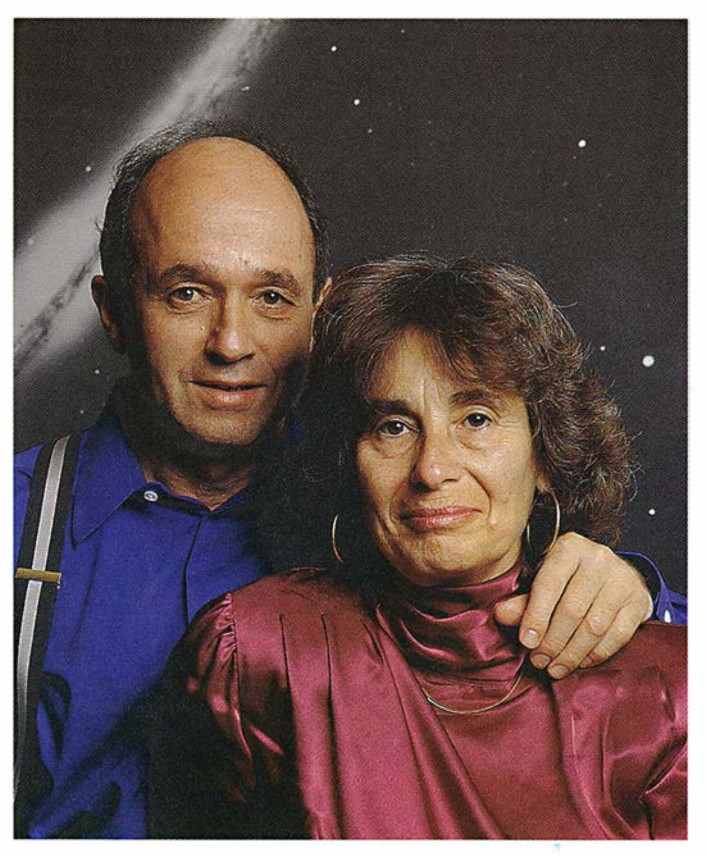
En su libro sobre las dos culturas, C. P. Snow deploraba, en 1959, la escisión de las humanidades y las ciencias en dos ámbitos separados e incompatibles. El matrimonio, ese mismo año, entre Jeremiah P. Ostriker y Alicia Suskin Ostriker desmiente la existencia de semejante hiato. Jeremiah, cosmólogo de prestigio, dirige el departamento de astronomía y astrofísica de la Universidad de Princeton. Alicia, profesora de literatura inglesa en la Universidad de Rutgers, cultiva con éxito la poesía y el ensayo.

"Snow se equivocaba", reflexiona Jeremiah. "Las dos culturas antagónicas se parecen mucho más que las que él consideraba intermedias." Alicia asiente: "Primero se conoce algo intuitivamente, y luego se intenta probar", dice. "Si resulta que no puede probarse, entonces uno estaba equivocado. Escribir un poema es muy parecido. Intentas dar con la palabra justa; si no lo consigues, es que realmente no sabías qué poema querías escribir."

Alicia ensalza también las ventajas prácticas del matrimonio (literal) de la ciencia con las humanidades. "Me preguntan con frecuencia si no es la nuestra una mezcla rara de profesiones. Siempre respondo lo mismo; no es infrecuente y entra dentro de toda razón casarse con un creador e intuitivo que no trabaje en tu mismo campo ni le disputes el sitio."

Los Ostriker han vivido en mundos cercanos, aunque distintos. Los dos crecieron en Manhattan; él, en el barrio de la intelligentzia neoyorquina; ella, en las viviendas de protección oficial del extremo norte de la isla. En Boston (Jeremiah estudiaba en Harvard, Alicia en Brandeis) se prometieron. Se casaron en el último año de carrera. Jeremiah comenzó su carrera investigadora con la estabilidad de las estrellas rotantes, en la Universidad de Chicago, bajo la dirección de Subrahmanyan Chandrasekhar, que le infundió el gusto por la perfección. Alicia, mientras tanto, continuó con su trabajo sobre literatura en la Universidad de Winsconsin, donde consiguió doctorarse en tan sólo tres años. "Me parece todo un récord."

Acabados los estudios de posgrado, enviaron una solicitud de contrato a diversas universidades, Princeton entre ellas, de donde le llegó a Alicia la siguiente contestación: "Una ojeada a nuestro directorio le habría revelado que todos los docentes aquí en Princeton son varones. La respuesta, pues, debe ser negativa." Pero llegó en buena hora un contrato de la Universidad de Rutgers, donde continúa enseñando lengua inglesa. Princeton sí acogió a Jeremiah. También ha permanecido allí desde entonces.



JEREMIAH Y ALICIA OSTRIKER cultivan, con vetas similares de creatividad, campos dispares

Jeremiah no ha dejado de ampliar el ámbito de sus intereses científicos, desde las estrellas hasta el universo entero pasando por las galaxias. A principios de los setenta abordó la dinámica de la rotación de las galaxias. Rememorando su trabajo de doctorado, se dio cuenta de que una galaxia espiral plana en rotación no podía permanecer estable. Ostriker formó equipo con su colega de Princeton P. J. E. Peebles para realizar simulaciones de galaxias en el ordenador. Encontraron que las galaxias sólo permanecían estables si se hallaban rodeadas de un halo esférico de material invisible, de materia oscura.

El artículo resultante, publicado en 1974, constituyó un hito, y hoy se acepta ya que el universo visible es sólo una pequeña fracción de lo que realmente existe ahí fuera. Y puso de manifiesto la capacidad de Ostriker para ver más allá del saber aceptado. "En los campos científicos más jóvenes, si uno dice que todos los puntos de vista aceptados son falsos, rara vez se equivoca", afirma.

Esa misma actitud impregna su trabajo actual, sobre el desarrollo y contrastación de modelos que expliquen el origen de la estructura cósmica: galaxias, cúmulos de galaxias y agregaciones mayores que vemos desplegadas en los últimos mapas del universo. "No cabe duda de que hubo una gran explosión y de que fue una gran explosión caliente. Pero, ¿entendemos el origen de las estructuras en ese marco teórico? No. Personalmente, sospecho que ninguno de los modelos de los que ahora consideramos es correcto", concluye Ostriker.

Se muestra particularmente escéptico ante los modelos estándar de la cosmología inflacionaria, una variante de la gran explosión bastante popular y estéticamente atractiva. Esas hipótesis requieren que el universo contenga mucha más materia oscura de la que los observadores puedan ver o deducir de la rotación de las galaxias. Además, por razones teóricas, esa masa adicional debe estar constituida por partículas que no interactúen con la luz o con la materia ordinaria. No existe prueba alguna de que realmente exista la exótica materia oscura adicional postulada por la mayoría de los modelos inflacionarios. "Es un material para el que no hay medición posible, pero que les gustaría que hubiera", denuncia con calor. "No hay motivos, aparte de los ideológicos, para aceptarlo."

Peebles y él, por contra, han estado tanteando modelos cosmológicos que prescindan de la materia oscura exótica. Ostriker ha continuado investigando las implicaciones de las cuerdas cósmicas, la constante cosmológica y otras complicadas hipótesis astrofísicas. "Me las imagino a manera de juguetes. Especulo divertido con ellas, siempre y cuando haya algo de ciencia por medio, para así sacar algo razonable de lo que antes no lo era. ¿Quién sabe? A lo mejor acierto."

Alicia piensa en iguales términos. Sostiene que la literatura no difiere de la astrofísica por lo que respecta a las nuevas ideas. "Se contrastan con la realidad tal como uno la percibe, y ese trabajo es una búsqueda de la verdad." Afirmada en ese principio, ha desarrollado una voz literaria tan propia y fresca como la de su marido. En su primer año de doctorado, cierto profesor visitante se tomó a chacota su poesía: "Ustedes las mujeres son muy gráficas, ¿verdad?" Haciendo honor a esa observación, se puso a darle vueltas a lo que significa ser poetisa. En los siete volúmenes de poemas que ha publicado, Ostriker aborda muchas facetas de esa identidad: sexualidad, mortalidad y experiencias sensibles.

Tras su segundo embarazo, Alicia comenzó un largo poema sobre la concepción y el alumbramiento de un hijo. Apareció en 1970, con el título *Once more out of darkness*. Para su sorpresa, un grupo militante de alumnas feministas puso reparos a su canto a la maternidad. Sin amilanarse, escribió un ensayo en el que alababa la tarea de criar a los hijos porque pone al artista en contacto con el mundo factual, y expresaba su esperanza de que la maternidad gozara un día de la misma preeminencia en la literatura que el sexo o la guerra.

En su faceta ensayística, Alicia escribió un libro sobre el poeta radical británico William Blake y preparó sus poesías completas comentadas, resultado de su trabajo de doctorado. En los años setenta, analizó la naturaleza de la voz femenina en la literatura moderna en diversos ensayos. En 1986 volvió a cambiar de rumbo porque "mis intereses variaron, y me pasé mucho tiempo leyendo la Biblia".

Asegura Alicia que la ciencia es importante en su trabajo, aun cuando en sus poemas nunca se ocupe de un tema científico. "Mi mente está configurada por lo que yo sé sobre la ciencia y por mi conocimiento de cómo ve el mundo la ciencia, y frecuentemente echo mano de sus propias metáforas." Opina que hay un vínculo entre su estilo literario y el estilo de investigar de su marido. "Es hasta cierto punto similar: él es un cosmólogo sin escuela, y yo escribo como la poetisa o la ensayista que soy sin someterme a ninguna línea ideológica o doctrina. Es probablemente la proximidad al punto de vista científico, junto con mi propio escepticismo y mi sentido de la realidad material, lo que me retrae de posturas doctrinarias."

La literatura no difiere de la astrofísica por lo que respecta a las nuevas ideas, sostiene Alicia Ostriker

Jeremiah Ostriker reconoce, a su vez, la influencia del enfoque literario en su vida intelectual. Rememora una clase impartida por el poeta Archibald McLeish. Cada semana, McLeish escogía un poema y les pedía a sus alumnos que lo analizaran bajo cualquier punto de vista que consideraran interesante. El secreto de elaborar un buen escrito residía en abordarlo desde una perspectiva sugerente. "Se me ocurrió que esta manera de enseñar me ayudaba mucho más a mí, un profesor principiante, que la mayoría de los manuales técnicos, que acostumbran plantear rompecabezas enrevesados cuyas soluciones se encuentran al final del libro. Me parecía entonces, y me lo sigue pareciendo ahora, que cuando la respuesta no está en los apéndices, los alumnos que luego sobresalen son los que escogen los problemas interesantes y que dan con los aspectos correctos en los que fijarse. Requiere otras habilidades totalmente distintas, ¿no cree?"

Su aprecio por el pensamiento sin tintes ideológicos y la experiencia de su mujer en la vida académica le han llevado a Jeremiah a reflexionar sobre el papel de la mujer en astrofísica. "He estado tentado durante algún tiempo a escribir un libro para contar cómo los principales descubrimientos en astrofísica, desde la segunda guerra mundial, han sido realizados por mujeres, precisamente porque no pertenecen al sistema." Señala algunos ejemplos: Beatrice Tinsley, descubridora de la evolución de las galaxias, Vera C. Rubin, que halló pruebas de la existencia de materia oscura en las galaxias, y Neta A. Bahcall, que reconoció la organización de cúmulos de galaxias muy distantes. En todos esos casos, "la gente que entendía las cosas 'sabía' que eso era imposible", dice. "Pero las mujeres no lo sabían."

Los Ostriker señalan otro aspecto, no tan cómodo, en que la astrofísica y la poesía son similares. Ambas parecen intimidar al lego. Harto ya de la reacción de la gente ante su vocación real, Jeremiah suele responder a los impertinentes de las reuniones sociales: "Me dedico a la fabricación de bombas." Alicia comenta algunas contestaciones de los desconocidos con quienes le toca compartir asiento en el avión al oír cuál es la profesión de ella. Hay quienes le espetan: "Lo siento, no sé ni cómo se escribe", o, "Pues a mi mujer le gusta leer".

¿Por qué abundan quienes se sienten lejos del mundo científico o literario? Jeremiah se remonta hasta Euclides y el lenguaje matemático de la ciencia. "Eso es lo que siempre me parece más notable, que el mundo físico obedezca las matemáticas. Hay algo incomprensible en ello que resulta inquietante para la mayoría de la gente que no está acostumbrada."

Alicia conviene en que el problema comienza en los mismos orígenes del pensamiento científico, pero señala con su dedo acusador a Platón. "Pienso que Platón es responsable no sólo de la ciencia sino del odio a la ciencia, por haber inventado el dualismo, la noción de que idealmente deberíamos experimentar nuestros seres, nuestras almas, nuestras esencias, como algo separado de la naturaleza. Muchos científicos y humanistas quieren considerar el ser humano como algo separado del resto del universo. Pero en tanto en cuanto se hace poesía real y ciencia real, los sujetos obran formando parte del cosmos."

Hacia un mayor rendimiento del automóvil

¿Baterías, pilas de combustible? El rediseño de los motores de combustión interna tradicionales permitirá respirar aires más limpios y limitar las importaciones de petróleo

John DeCicco y Marc Ross

La general preocupación por la salud y la seguridad, por preservar el entorno y reducir la dependencia del petróleo presiona por el logro de un automóvil mejor. Aunque los atascos de tráfico y los accidentes provengan de la conducción y no del combustible utilizado, lo cierto es que gran parte de la contaminación urbana, la emisión de gases causantes del efecto de invernadero y las onerosas importaciones de petróleo están directamente ligadas al consumo de combustible. En todo el mundo sigue creciendo el parque automovilístico, y el rendimiento de los combustibles debe potenciarse todavía más aprisa para evitar que se agudicen los problemas.

En septiembre de 1993, la industria norteamericana y la administración Clinton anunciaron una asociación histórica para el desarrollo de vehículos que consumieran en combustible sólo un tercio de lo que hoy gastan los transportes, sin rebajar la comodidad, seguridad y prestaciones. Las principales opciones se decantan por vehículos eléctricos propulsados por baterías o pilas de combustible, y vehículos híbridos donde la transmisión eléctrica se combina con un motor de combustión que admite muy diversos combustibles. Pero mientras se estudian tales alternativas, los coches y camiones con motores de gasolina o diésel seguirán dominando las carreteras durante las próximas décadas. Ciertamente ofrecen una notable fiabilidad, comodidad y útiles servicios a costes tolerables. Además, están sostenidos por una enorme infraestructura económica: fábricas, refinerías, estaciones de servicio y personal adiestrado para hacer funcionar el sistema.

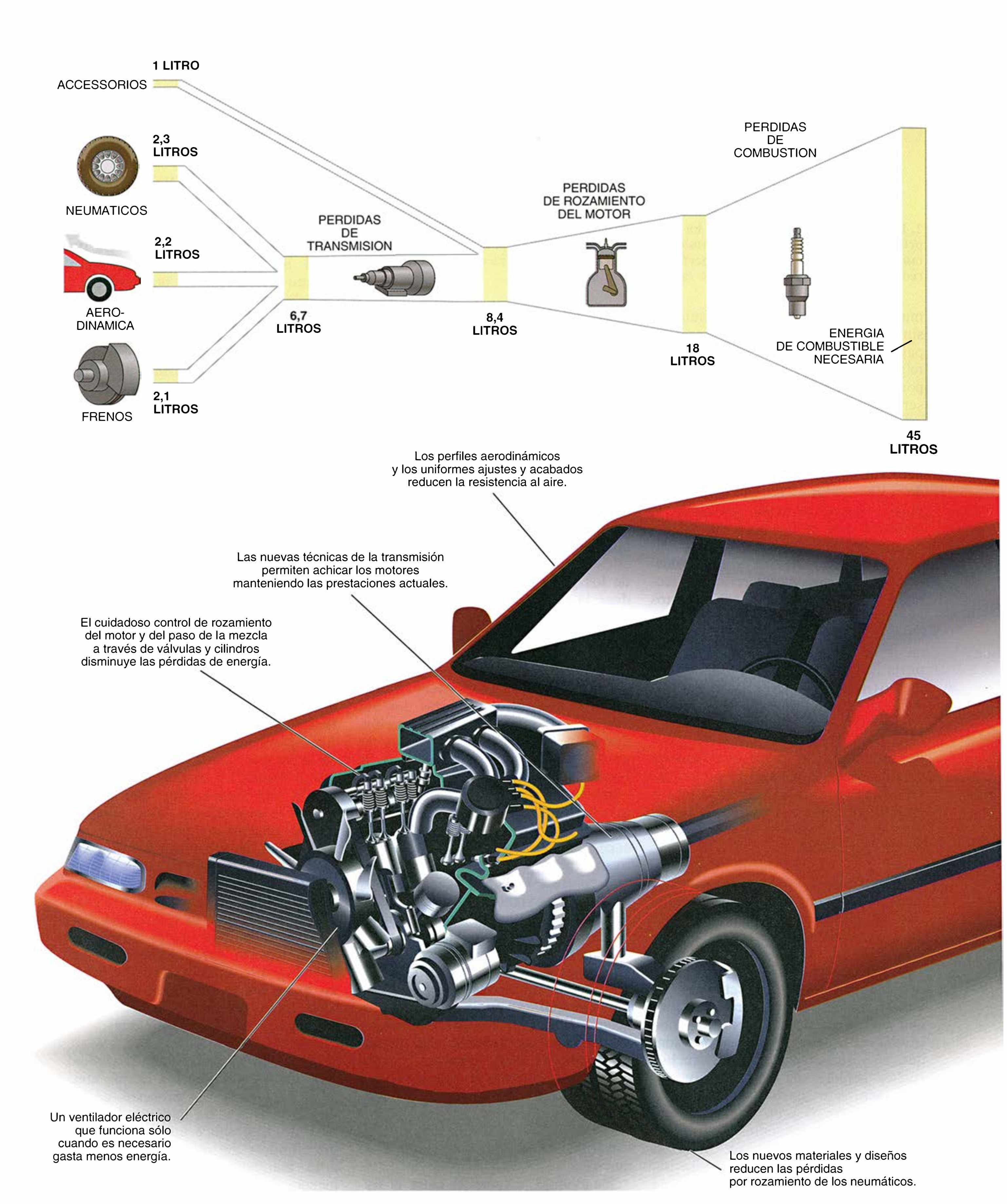
JOHN DeCICCO y MARC ROSS trabajan juntos, desde hace varios años, investigando vías de ahorro en el consumo de los vehículos a motor. DeCicco se doctoró en ingeniería mecánica por la Universidad de Princeton. Ross, doctorado en la de Wisconsin, enseña física en Michigan.

La perpetua tensión de la ingeniería del automóvil contribuye también a la longevidad de los coches con motor de combustión interna. Si bien hace ya un siglo que Carl F. Benz, Rudolph C. K. Diesel y otros pioneros imaginaron casi todos sus perfeccionamientos posibles, sólo en tiempos muy recientes han podido muchos de ellos llevarse a la práctica, al permitir las nuevas técnicas desligar las ingenierías de diseño y de producción. Gracias a los microprocesadores, sensores y controles electrónicos pueden hoy optimizarse numerosas operaciones; los materiales han adquirido mayor resistencia, ligereza y adaptabilidad. El diseño asistido por ordenador permite crear y perfeccionar con rapidez los modelos de vehículos. Por otra parte, muchos de los progresos logrados en los modelos tradicionales ligeros resultan esenciales para vehículos de otros tipos. A largo plazo tal vez haya que adoptar planteamientos radicalmente distintos, pero en este final del siglo XX no se requieren soluciones espectaculares, pues las ingenierías pueden aportar todavía sustanciales ventajas.

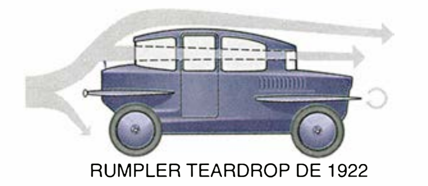
Para aumentar el rendimiento del combustible, debe comenzarse por examinar cómo y dónde utiliza el coche la energía. El consumo de combustible depende del tipo de conducción así como de las características del vehículo. Por ejemplo, se gasta más combustible en las calles congestionadas, por las frecuentes paradas y arranques. Los técnicos utilizan la expresión “carga de uso final” para indicar cualquier aspecto del funcionamiento del vehículo que consume potencia suministrada por el motor. En estas cargas se incluyen la pérdida de frenado, el rozamiento de los neumáticos, la resistencia aerodinámica y los accesorios (acondicionamiento del aire y dirección asistida). La energía necesaria para afrontar esas cargas ha de multiplicarse considerablemente, puesto que hay que superar las pérdidas producidas en todo el tren propulsor. Dicho tren, formado por el motor, la transmisión y los componentes asociados, convierte la energía aportada por el combustible en energía mecánica útil que propulsa el coche y hace funcionar sus accesorios. Tras considerar la termodinámica de la combustión y el rozamiento, sólo queda disponible para las cargas de uso final la sexta parte de la energía que encierra la gasolina. Dicho de otro modo, los trenes propulsores de hoy día tienen un 17 por ciento de rendimiento en una conducción de tipo medio.

Para valorar la capacidad de aumentar el ahorro de combustible, analizamos un conjunto de modificaciones de diseño de bajo coste, en su mayoría ya realizadas en modelos que ruedan por las carreteras. La reducción de los rozamientos en el tren propulsor ofrece un camino seguro hacia un mayor rendimiento. Otro enfoque consiste en disminuir las cargas de uso final; aun sin manipular en absoluto el tren propulsor, las modificaciones en los neumáticos, la aerodinámica y la masa del vehículo conseguirán rebajar la energía que requiere el automóvil. Y ya sabemos que cada unidad de energía economizada por las cargas finales se traduce en seis unidades de ahorro de energía total. La reducción de carga es, como vemos, fundamental.

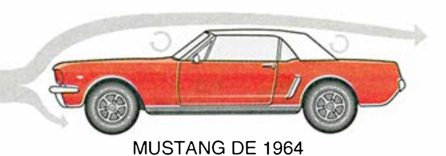
La disminución de la masa del vehículo ejerce un importante efecto



1. LAS EXIGENCIAS DE COMBUSTIBLE se forman en varias etapas (*ilustración superior*), empezando por la energía perdida en neumáticos, resistencia aerodinámica, frenado y accesorios. La energía requerida se multiplica por 1,11 para vencer el rozamiento de la transmisión y por un nuevo factor de 2,2 para compensar el rozamiento del motor. Finalmente, las pérdidas de combustión multiplican la demanda de energía por otro 2,5. Se utilizarán nuevos materiales, diseños y técnicas (*ilustración inferior*) que conseguirán mínimas pérdidas en las primeras etapas del proceso de multiplicación.







2. LA MAYOR ESTILIZACION ha hecho descender la resistencia aerodinámica. Un primer intento de perfil aerodinámico fue el Rumpler Teardrop. Los diseños futuros, muy probablemente basados en perfiles como el del Opel Calibra o el Impact, podrán reducir en más del 25 por ciento la resistencia al aire.

multiplicador sobre el rendimiento, similar al de una onda que se propaga. Al ser más ligero, el coche requiere menos potencia y los componentes de su tren propulsor podrán ser de menores dimensiones. Con esto, la masa sufrirá una nueva reducción. Un coche nuevo, llenos el depósito de gasolina y el radiador pero sin pasajeros, pesa un promedio de 1300 kilogramos. Obviamente se puede reducir la masa achicando el vehículo, pero descartamos esta opción de nuestro análisis. Optamos por utilizar materiales ligeros y más resistentes combinados con refinadas técnicas de diseño y fabricación. Estos nuevos materiales y el mejor aprovechamiento del espacio permiten reducir la masa sin sacrificar la amplitud ni la capacidad de transporte. Evaluamos la reducción de peso que podría así conseguirse, compensando el peso suplementario de bolsas neumáticas y paneles de refuerzo de puertas que exige la seguridad. Nuestra conclusión es que, aplicando los diseños más avanzados del momento y empleando nuevos materiales, puede reducirse el peso de un coche hasta un 25 por ciento.

Hay quien se opone a reglamentar la economía de combustible con el pretexto de que reducir la masa equivale a disminuir la seguridad. Pero la mayor protección ofrecida por los automóviles pesados se convierte en poder destructor para la demás gente. Los pasajeros van mucho más protegidos en coches construidos con materiales ligeros, aunque muy resistentes, que en muchos coches actuales de mayor peso; por otro lado, estos coches nuevos encierran menores riesgos para los ocupantes de otros vehículos en caso de choque. La seguridad se garantiza mediante unos sistemas de limitación mejores y perfeccionamientos en la estructura y superficies interiores del vehículo que reduzcan al mínimo la energía de colisión transferida a las personas. El buen comportamiento en caso de accidente no radica en la masa ni en las dimensiones del vehículo, sino en características de protección de los pasajeros que no dependen del tamaño.

Tanto si el vehículo es pesado como si es ligero, el pobre rendimiento del tren propulsor reduce la economía de combustible. La mejor manera de aumentarla consiste en limitar los rozamientos en el motor, que consumen alrededor de la mitad del combustible. En el motor, los pistones recorren el interior de los cilindros, desplazando cada uno de ellos cierto volumen. La expansión de los gases empuja el pistón y produce la potencia. Se llama cilindrada del motor al volumen total que desplazan los cilindros. Un motor mayor suministrará más potencia pero a costa de un rozamiento mayor.

Entre las válvulas, pistones, bielas, árbol de levas y otras piezas móviles aparecen rozamientos por fricción. También hay pérdidas en piezas auxiliares, como el ventilador y la bomba de agua. Los rozamientos por bombeo se producen al inyectar la mezcla de aire y combustible en los cilindros y expulsar los gases de escape. Concretamente, se presenta tal rozamiento en la válvula reguladora que controla la admisión de aire.

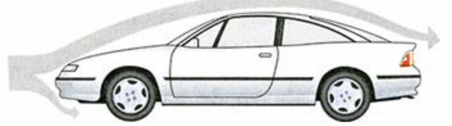
Los refinamientos aportados al diseño, técnicas de fabricación, materiales y lubricación reducen al mínimo los rozamientos por fricción. Las pérdidas auxiliares se pueden aminorar a través de ciertas modificaciones; por ejemplo, sustituir el ventilador accionado por correa por un ventilador eléctrico que funciona sólo cuando es necesario. Para rebajar el rozamiento por bombeo se puede recurrir a un control inteligente de los procesos de admisión y escape. Y todas estas pérdidas por rozamiento descenderán, si el motor se reduce de tamaño.

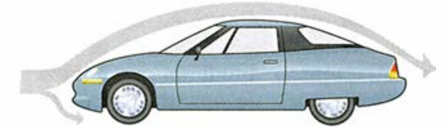
Estudiando la relación entre el trabajo consumido en rozamientos y la potencia del motor se advierten importantes vías para elevar el rendimiento del tren propulsor. La potencia de salida viene mermada por el rozamiento interno, y debe satisfacer las exigencias de las cargas de uso final más la transmisión. El rozamiento del motor es proporcional a la velocidad y cilindrada del mismo. La potencia de salida, sin embargo, no depende necesariamente de estos factores. Hay técnicas que proporcionan la potencia requerida, al tiempo que reducen la velocidad o cilindrada media del motor —incluso parando el motor cuando no se necesita potencia—, ofreciendo medios para rebajar el rozamiento sin dejar de cumplir los requisitos de salida.

El valor de numerosas mejoras de rendimiento se mide por su efecto en la potencia específica, entendida como relación entre la potencia máxima de salida y la cilindrada del motor. Las técnicas que realzan la potencia específica permiten atender las cargas del vehículo con una cilindrada menor. El aumento del número de válvulas mejora el flujo a través de los cilindros. Así, los motores de cuatro válvulas superan en un 40 por ciento la potencia específica de los motores de dos válvulas. Análogamente, los diseños de árbol de levas en cabeza refuerzan la potencia específica media al menos en un 20 por ciento. Hay que aceptar ciertos compromisos, tales como el mayor rozamiento por fricción que introducen las válvulas añadidas. Los motores con cuatro válvulas por cilindro y árbol de levas en cabeza dan su potencia máxima a velocidades elevadas, por lo que se necesita introducir cambios en el sistema de multiplicación para conducir cómodamente. Los diseños que han logrado éxito toman en cuenta estos factores para recorrer más kilómetros por litro a un coste aceptable.

Quizá la innovación más radical en los motores sea la que afecta al control de los procesos de admisión y escape. La ignición del combustible se produce en el interior de los cilindros del motor, y una cuidadosa manipulación del paso de la mezcla de combustible y los productos de escape a través de los cilindros puede elevar el rendimiento mecánico. En los motores actuales, el momento y la amplitud de la apertura de una válvula dependen de la posi-





ción del pistón y no de la velocidad o la carga del motor. Los medios de detección y control electrónicos, unidos a los procesos de precisión en la fabricación, permiten utilizar un control variable de las válvulas. Con esta técnica se optimizan los flujos a través de los cilindros en una gama de condiciones muy amplia. Si la apertura de la válvula se hace mayor, la potencia máxima aumentará y podrá entonces reducirse la cilindrada. Cuando las cargas son bajas, una disminución del tiempo de apertura de las válvulas puede paliar el efecto de estrangulamiento, disminuyendo así el rozamiento por bombeo.

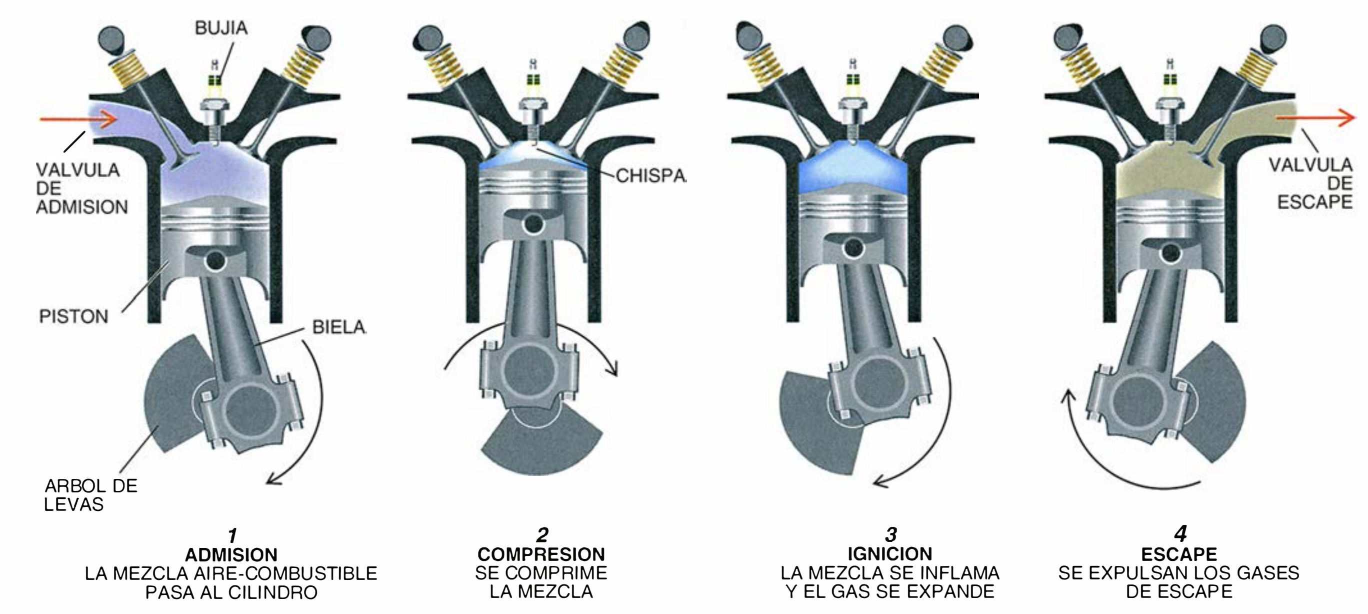
Antaño, los altos costes limitaban la instalación de mecanismos de control variable de válvulas. Hoy, las modernas técnicas de diseño y montaje permiten una aplicación generalizada. Desde finales de los ochenta, los fabricantes japoneses emplean cada vez más el control variable de válvulas. En 1992 Honda aportó una notable mejora al control de válvulas, por la cual se introdujo un motor de mezcla pobre en el mercado.

La mayoría de los motores de gasolina contemporáneos suelen funcionar con la cantidad exacta de oxígeno que requiere la combustión completa. En cambio, los motores de mezcla pobre trabajan con un exceso de aire en la mezcla. Entre sus ventajas se cuentan las menores pérdidas por bombeo y el superior rendimiento térmico. Pero la emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) crea un problema en estos motores: la reducción de los NO_x por catálisis es difícil en las condiciones de empobrecimiento. El desarrollo de un catalizador apropiado ofrece un activo campo de investigación, ya que su obtención conduciría a un empleo más general de la técnica de mezcla pobre.

Otra posible innovación, el motor de dos tiempos avanzado, también atrae la atención de la industria. Estos motores consiguen la compresión y la ignición de la mezcla de combustible y aire en menos emboladas que los motores convencionales de cuatro tiempos. Al ser menor el número de carreras del pistón, lo serán también las pérdidas por fricción. Más ligeros y potencialmente menos costosos que los de cuatro tiempos, los motores de dos tiempos también consumen mezcla pobre de combustible y aire.

Las modificaciones en la transmisión conjugadas con el motor pueden aportar impresionantes ahorros de energía. Aunque las ruedas del coche hayan de cubrir un margen muy amplio de velocidades en carretera, el motor funciona con suma regularidad y eficacia dentro de un margen de revoluciones por minuto bastante estrecho. La transmisión dispone de una gama de relaciones de multiplicación para acoplar el motor a las ruedas, de tal manera que el motor trabaje con eficacia a todas las velocidades del vehículo. Para aprovecharse al máximo de la reducción del tamaño del motor, es preciso diseñar una transmisión que haga funcionar con alto rendimiento al motor durante el mayor tiempo posible.

Los microprocesadores permiten hoy programar una transmisión que adapte de manera óptima la velocidad del motor a las necesidades de potencia. Al añadir engranajes a la transmisión se admiten más relaciones de multiplicación, con lo que una banda estrecha de velocidades del motor abarca mejor todo el margen de conducción. Con un motor pequeño se necesitarán cambios de velocidad más frecuentes, y podría notarse la diferencia conduciendo con tráfico intenso. Otra solución es reemplazar los engranajes discretos por una transmi-



3. MOTOR de cuatro tiempos de los coches. Los diseños avanzados permiten controlar el aire y el combustible que pasan al cilindro. La reducción del trabajo efectuado en el bombeo de gases de entrada y salida en el cilindro ofrece un nuevo ahorro de energía.

sión de variación continua, en la que se varía de manera progresiva la relación de multiplicación. En ambos casos, un cuidadoso diseño y el control electrónico ayudarán a suavizar las transiciones del cambio y evitarán que se resienta la conducción.

Tomando como base la flota de coches nuevos de 1990, desarrollamos una serie de estimaciones sobre la viabilidad de elevar el rendimiento en kilómetros por litro. El análisis examinó el grado en que puede aplicarse la tecnología disponible para lograr tal objetivo. Nuestras previsiones a medio plazo no comprenden los motores de mezcla pobre o de dos tiempos, pues no es tan seguro que su empleo se generalice, dadas las limitaciones sobre las emisiones de gases. Tras una selección de técnicas en razón de su eficacia, estimamos que hacia el 2005 el rendimiento del combustible de un coche nuevo podrá elevarse en un 65 por ciento, desde 10 hasta 16 kilómetros por litro. Puede conseguirse un aumento comparable para los camiones ligeros, ya que sus pérdidas de energía son similares a las de los coches.

Este incremento hasta 16 kilómetros por litro encarecería en unas 100.000 pesetas el precio al por menor del coche. El ahorro de gasolina obtenido ascendería a 9500 litros para un coche con 12 años de vida media típica, lo que supone una economía de 325.000 pesetas aunque los precios no suban. Introducir gradualmente estas mejoras en los coches y camiones ligeros durante los próximos 10 años ahorraría, sólo en los EE.UU., más de 400 millones de litros (2,8 millones de barriles) de gasolina diarios hacia el 2010.

Dado que en Estados Unidos cada vez se importa una mayor proporción del petróleo consumido, los 400 millones de litros ahorrados implican que las importaciones podrían reducirse al menos en 300 millones de litros diarios allá por el 2010. Además, tales ahorros de petróleo se conseguirían disminuyendo la agresión ambiental en vez de potenciarla.

El menor consumo de combustible aporta otros beneficios al medio ambiente. Se reducirán proporcionalmente las emisiones de dióxido de carbono. También depende del consumo de gasolina el volumen de vapores de hidrocarburos liberados en la atmósfera. Dichos hidrocarburos reaccionan con los óxidos de nitrógeno para formar a ras de tierra ozono, principal gas contaminante que agrava el asma y causa otras afecciones respiratorias. Dado que la mejora del rendimiento se autofinancia con los ahorros de combustible, la reducción correspondiente en las emisiones de dióxido de carbono e hidrocarburos no implicará costes adicionales. Podrán conseguirse aún mayores reducciones de la contaminación del aire mejorando las técnicas de control de las emisiones.

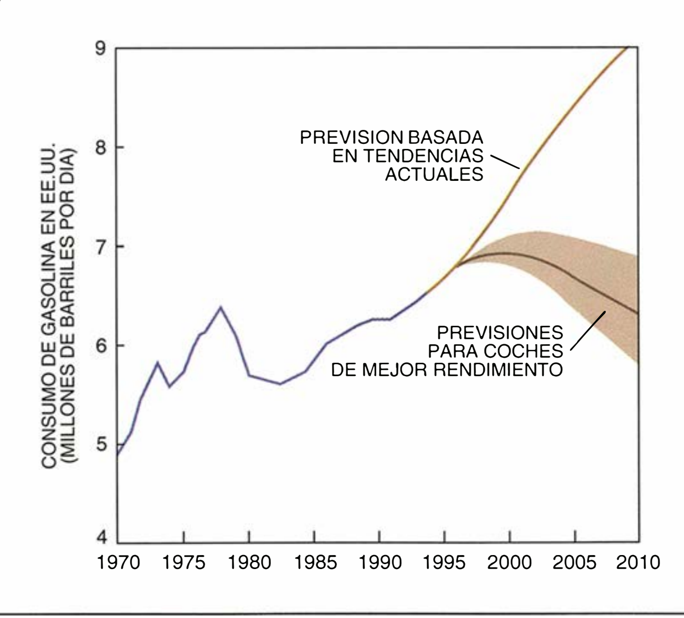
Potenciar el ahorro de combustible en coches y camiones también acarreará beneficios económicos. Las sumas invertidas en importar petróleo se pierden casi enteramente, y las compras de gasolina proporcionan relativamente pocos puestos de trabajo. Gracias a este superior rendimiento, los consumidores podrán dedicar a otros bienes y servicios el dinero que se ahorren en gasolina. Ello estimulará a las industrias nacionales, incluidas las de automoción, y fomentará la creación de empleo. Se ha alegado que el reglamentar unos valores superiores de rendimiento conduciría a la destrucción de empleos. Esto no es cierto, desde un planteamiento de introducción técnica gradual que no recurra a las fáciles economías de combustible obtenidas al fabricar vehículos más pequeños. En un escenario similar al que aquí se describe, nuestro modelo económico presenta un incremento neto de 100.000 a 250.000 puestos de trabajo, sólo en EE.UU., para el año 2010.

La mayoría de las técnicas que hemos considerado ya se han introducido en coches que ruedan por las carreteras. Aunque el ahorro de combustible es claramente rentable a largo plazo, hay poco interés en el mercado por la aplicación de mejoras técnicas para reducir el consumo de energía, ya que los precios de la gasolina se mantienen en un nivel bajo estable. En lugar de buscar rendimientos kilométricos superiores, los fabricantes se afanan por introducir avances de ingeniería que potencien las prestaciones y el lujo de los automóviles, aumentando sus dimensiones y su peso. Los modelos lujosos y potentes dominan hoy los sectores más lucrativos del mercado. Y resulta que, entre todos los modelos puestos a la venta en un determinado año, los vehículos más eficaces en consumo

Lo que cuesta fomentar el ahorro de combustible

Es difícil estimar el coste de aumentar el ahorro de combustible porque las informaciones sobre fabricación no suelen divulgarse. Los autores desarrollaron un modelo económico basado en informes publicados que analizaban los precios de las técnicas existentes y aprovechables. Evaluando el grado en que podía utilizarse cada uno de los posibles perfeccionamientos en los nuevos coches y camiones ligeros, se clasificaron las distintas técnicas con arreglo a sus costes, amortizados en los 12 años de vida media de un vehículo.

Se prevé que el consumo de combustible en automóviles crecerá según la curva marcada en el gráfico (*marrón claro*). La zona sombreada predice el consumo si se introducen en los próximos 10 años las técnicas economizadoras. La estimación moderada (*marrón oscuro*) corresponde a 16 kilómetros por litro.



tienden a ser los más pequeños, lentos y los más modestos de su gama.

Se venderían bien coches y camiones de mejor rendimiento si se dieran condiciones diferentes, propiciadas por distintas políticas nacionales (reglamentación del ahorro de combustible, incentivos a reducir precios de vehículos o grandes subidas de impuestos sobre el combustible) o por acontecimientos internacionales como las guerras o las decisiones monopolísticas de limitar suministros de petróleo. Las universales ventajas de reducir el consumo de gasolina justifican las directrices de carácter público orientadas a la utilización de vehículos de superior rendimiento.

A los usuarios y a los fabricantes se les plantea un dilema a la hora de elevar el rendimiento kilométrico. En el mercado actual, los usuarios tienen escaso interés en sacrificar parte de las prestaciones o el lujo de sus vehículos en aras de una mayor economía de combustible, dado que su ahorro directo no sería condicionante. En cambio, sí podrían desear ver resueltos los problemas energéticos y medioambientales. Un planteamiento en el que participe todo el mundo, y no se base en las preferencias de los compradores de coches nuevos, puede responder con eficacia a las preocupaciones públicas a pesar del desinterés del mercado.

Análogamente, se arriesga a perder clientes el fabricante que aplique los avances de la ingeniería a aumentar el rendimiento en kilómetros, y probablemente tendrá más suerte el que utilice los mismos perfeccionamientos para potenciar las prestaciones. Los riesgos de actuar en solitario pueden desaparecer si existe una reglamentación que ofrezca a todos los fabricantes incentivos para economizar combustible. Endurecer las normas de economía de combustible para el promedio del parque de automóviles aportaría tal estímulo, a la par que una gran flexibilidad en el diseño. La industria puede adoptar enfoques diferentes para cada línea de vehículos y asegurar que se cumpla el objetivo general de reducir el consumo de combustible.

Con miras a fomentar el interés del mercado, puede ser útil complementar las normas con incentivos especiales, como alzas de impuestos a los coches tragones de gasolina y rebajas a los de rendimiento superior al promedio. Ciertos economistas señalan que el imponer normas de ahorro de combustible puede tener desfavorables repercusiones. El mayor rendimiento disminuye el coste de los trayectos recorridos, y la gente tiende a conducir más, lo que contrarresta los ahorros. Hay quien saca la conclusión de que es mejor subir los impuestos sobre la gasolina para reducir el consumo. Se comprueba, sin embargo, que tales efectos sólo anulan una parte de las ventajas de la reglamentación. El precio de la gasolina afecta mucho menos de lo presumible al nivel de utilización del automóvil. Mucho más influyen los precios de los aparcamientos —o la carencia de ellos—, así como la construcción de carreteras. De ahí que pueda ser conveniente subir el impuesto sobre la gasolina, además de justificable, pero la presión fiscal por sí sola es un arma débil para controlar el consumo de combustible.



4. LOS SISTEMAS DE SOLDADURA AUTOMATICA son esenciales para el montaje de carrocerías. Las innovaciones en fabricación, tales como la soldadura por láser que deja uniformes las junturas, ayudarán a mejorar el rendimiento energético.

Llegará la hora en que los coches de gasolina y camiones ligeros tendrán que ser reemplazados por otros de diseño fundamentalmente nuevo. Esta perspectiva justifica los actuales esfuerzos en investigación y desarrollo. Pero el conseguir un mejor rendimiento ofrecerá, en plazo más bien breve, beneficios tangibles. Muchos de estos progresos, especialmente las reducciones de las distintas cargas, son pasos importantes hacia una nueva generación de vehículos que utilizará trenes de propulsión eléctricos y pilas de combustible.

El rendimiento kilométrico de los nuevos vehículos ligeros apenas ha mejorado en los últimos doce años. El obstáculo más serio encontrado ha sido la falta de interés del mercado, no la carencia de recursos técnicos. La puesta en vigor de normas más exigentes y de incentivos para elevar el ahorro requiere un control de los poderes públicos. Comparados con los coches nuevos de hoy, los automóviles perfeccionados tendrían el mismo tamaño, idéntica capacidad de transporte y de aceleración, pero serían más ligeros, más aerodinámicos y resistirían mejor los choques. Asimismo, su nivel de emisiones sería inferior, y superior el rendimiento kilométrico por litro. Las ventajas a obtener —ahorro directo del usuario, reducción de las importaciones de petróleo, menores emisiones de hidrocarburos y gas carbónico, y crecimiento del empleo— indican que fomentar la economía de combustible es una de las mejores inversiones que puede hacer un país.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TRANSPORTATION AND GLOBAL CLIMATIC CHANGE. Dirigido por D. L. Greene y Danilo J. Santini. American Council for an Energy-Efficient Economy, Berkeley, 1993.

AN UPDATED ASSESSMENT OF THE NEAR-TERM POTENTIAL FOR IMPROVING AUTOMOTIVE FUEL ECONOMY. John DeCicco y Marc Ross. American Council for an Energy-Efficient Economy, Berkeley, 1993.

AUTOMOBILE FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS: EFFECTS OF VEHICLE AND DRIVING CHARACTERISTICS. Marc Ross en *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 19, págs. 75-112; 1994.

Hemoglobinas vegetales

El descubrimiento de hemoglobinas en las raíces de diversas plantas superiores sugiere que el gen que las determina, compartido por vegetales y animales, procede de un organismo ancestral común

Manuel Becana

Las plantas superiores contienen pigmentos con muy diversas funciones. Recordemos, por ejemplo, los pigmentos fotosintéticos, constituidos por clorofilas y carotenoides, que participan en la captación de energía luminosa; los pigmentos florales, en su mayoría flavonoides, cuya finalidad es la atracción de insectos polinizadores; o el fitocromo, una proteína azul-verdosa que controla varios aspectos del metabolismo y del desarrollo de las plantas.

Menos familiar nos resulta la leghemoglobina, pigmento de color rojo que se encuentra en los nódulos radicales de las leguminosas y que es indispensable para el proceso de fijación de nitrógeno. Trataremos aquí de esta proteína y de otras hemoglobinas vegetales. Pero conviene conocer antes la biología de la fijación.

Para reducir ("fijar") el nitrógeno atmosférico a amonio, las leguminosas y las plantas actinorrícicas se valen de microorganismos (bacterias u hongos) que viven simbióticamente asociados con sus raíces. El amonio, o nitrógeno fijado, pasa a formar parte de proteínas, ácidos nucleicos, porfirinas y alcaloides. La fijación biológica ofrece ventajas sustanciales sobre la fertilización química, pues supone un notable ahorro energético y no provoca los efectos contaminantes de los abonos nitrogenados.

En el caso de las leguminosas, los microorganismos simbióticos son bacterias pertenecientes mayoritariamente a los géneros *Rhizobium* y *Bradyrhizobium*. Como resultado de la interacción genética, bioquímica y fisiológica entre los dos simbiontes —microorganismo y planta— se forman los nódulos, tumoraciones de forma esférica o cilíndrica, ramificadas en algunos casos. La formación de los nódulos suele iniciarse con la entrada de las bacterias del suelo a través de la pared celular del pelo radical. La pared, invaginada, origina una estructura tubular, denominada cordón de infección, por donde progresan las bacterias hasta alcanzar el citoplasma de las células de la zona central de la raíz. No se mezclan con el resto de orgánulos citoplasmáticos, sino que se mantienen confinadas en los simbiosomas, vesículas protegidas por membranas; los simbiosomas del lupino contienen una bacteria; los de la soja, varias. La membrana del simbiosoma actúa a modo de barrera que controla el flujo de ácidos dicarboxílicos, que constituyen la fuente de carbono para las bacterias. Estos ácidos orgánicos, transportados a los nódulos a través de los vasos del floema, proceden de la oxidación de los azúcares sintetizados en la hoja durante la fotosíntesis.

Durante el proceso de formación de los simbiosomas, las bacterias se van transformando en bacteroides. Son éstos las auténticas formas fijadoras de nitrógeno, que expresan diversas proteínas específicas, como la enzima nitrogenasa y algunos citocromos.

Además de las células infectadas por las bacterias, en la zona central de los nódulos encontramos también numerosas células sin infectar, las intersticiales, muy activas en los procesos metabólicos. En las leguminosas de origen tropical o subtropical (soja y judía, por ejemplo), las células intersticiales intervienen en las últimas etapas de la síntesis de ureidos; incorporado en estos compuestos, el nitrógeno fijado por la nitrogenasa se exporta, de los nódulos a la parte aérea, a través de los vasos del xilema. El nódulo constituye, pues, la estructura donde se asienta una auténtica simbiosis metabólica: la planta proporciona azúcares (fuente de carbono y energía) al bacteroide, y éste, a cambio, suministra a la planta nitrógeno en forma asimilable.

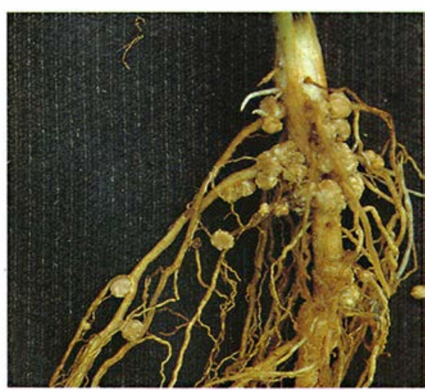
Para que los nódulos de las leguminosas fijen nitrógeno, es imprescindible que contengan leghemoglobina, proteína cuyo nombre es contracción de leguminosa y hemoglobina. ¿En qué consiste y cómo interviene en el proceso de fijación?

En 1939, H. Kubo descubrió en los nódulos de soja cierto pigmento rojo y demostró que se trataba de una hemoproteína. El hallazgo se generalizó a otras leguminosas. La leghemoglobina en cuestión consta de un grupo hemo (protoporfirina IX) y de un único polipéptido (globina), de 16 kilodalton de masa molecular. En condiciones fisiológicas, el grupo hemo es sintetizado por los bacteroides y la globina (apoproteína) por los ribosomas de las células infectadas; hemo y globina se ensamblan en el citoplasma vegetal. Pero queda todavía mucho por conocer sobre el mecanismo molecular de la síntesis de la leghemoglobina.

La formación del grupo hemo viene estimulada por la bajísima concentración de O_2 en la zona central de los nódulos. No parece que ese paso sea, sin embargo, imprescindible para la síntesis de leghemoglobina. En efecto, se infectaron plantas de soja con cepas mutantes de *Bradyrhizobium japonicum*; la mutación, que afectaba al gen *hemA*, impedía que las bacterias fabricaran δ-aminolevulínico sintasa, enzima implicada en la síntesis del grupo hemo. Sorprendentemente, los nódulos mutantes seguían produciendo leghemoglobina.

Indu Sangwan y Mark O'Brian han resuelto recientemente esa paradoja. Observaron que, en los nódulos mutantes, la planta cedía ácido δ-aminolevulínico a los bacteroides, los

MANUEL BECANA obtuvo en 1992 el Premio Europeo de Fisiología Vegetal por sus trabajos sobre los radicales libres y sus efectos sobre las leghemoglobinas. Formado en la Universidad de Navarra, trabaja en la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.



1. ABUNDANCIA DE LEGHEMOGLOBINA en un nódulo radical de soja, según aparece en la sección transversa del mismo. La porción en blanco, que corresponde al córtex, rodea a una zona central roja y brillante que revela la concentración de esa hemoproteína. Los nódulos de soja (*abajo, izquierda*) son tumoraciones de las raíces formadas por la interacción genética, bioquímica y fisiológica entre la planta y bacterias del género *Bradyrhizobium*.

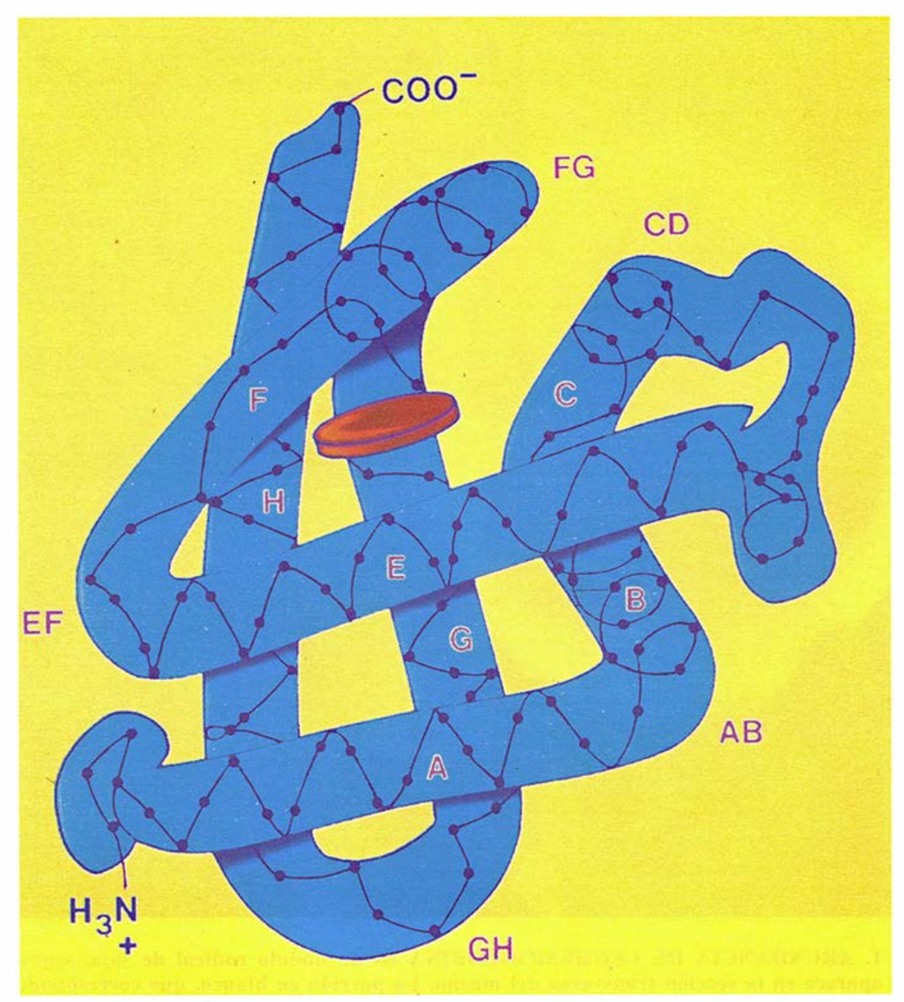
cuales sintetizaban el grupo hemo y lo transferían de nuevo a la planta para formar leghemoglobina. Se demostraba así la implicación de los dos simbiontes en una misma ruta metabólica: la síntesis de protoporfirina. Pero ese hallazgo no era necesariamente generalizable a otras simbiosis; por ejemplo, ciertos mutantes en el gen *hemA* de *Rhizobium meliloti* formaban nódulos de alfalfa carentes de leghemoglobina.

Otras investigaciones respaldan la posibilidad de que las células de los nódulos, y no los bacteroides, aporten el grupo hemo. Utilizando anticuerpos, Kate VandenBosch y Elton Newcomb, de la Universidad de Wisconsin en Madison, consiguieron detectar leghemoglobina, o al menos su apoproteína, en el citosol de las células intersticiales, aunque en una proporción cuatro veces inferior; parece probable que en este caso el hemo sea sintetizado por las mitocondrias.

Eso por lo que se refiere al mecanismo de síntesis de la proteína. Pero, ¿cuál es su función? Por lo que a la porción globínica concierne, sabemos que en los nódulos hay moléculas de leghemoglobina que difieren unas de otras en unos cuantos aminoácidos; o lo que es lo mismo: los nódulos contienen isoproteínas, que pueden separarse por técnicas de cromatografía y electroforesis. Las leghemoglobinas de judía, guisante, *Sesbania* (leguminosa tropical) y soja poseen dos, cinco, siete y ocho isoproteínas, respectivamente. Todas ellas parecen exhibir una afinidad similar por el O_2. Desconocemos, sin embargo, el significado biológico encerrado en la variación de las proporciones relativas de los componentes con el grado de desarrollo del nódulo.

Vayamos con el grupo hemo. Este se encuentra en forma ferrosa, Fe^{2+}, en los nódulos. Durante la extracción de la leghemoglobina, una pequeña proporción del mismo se oxida a la forma férrica, Fe^{3+}. Por eso, algunos investigadores implicaron erróneamente a la leghemoglobina en el transporte de los electrones necesarios para la reducción del nitrógeno en amonio. La fijación de nitrógeno requiere, efectivamente, electrones y gran cantidad de energía, que se produce en los bacteroides durante la oxidación (respiración) de los ácidos dicarboxílicos a agua por el O_2.

En 1958, Fraser Bergersen y Cyril Appleby, de la Organización para la Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth en Canberra, demostraron que la forma ferrosa de la leghemoglobina se combinaba reversiblemente con el O_2 en el citoplasma. Sugirieron que la proteína transportaba el O_2 requerido para la respiración de los bacteroides y, por tanto, para su labor fijadora de ni-



2. LEGHEMOGLOBINA de lupino a alta resolución. El modelo tridimensional de su estructura recoge la localización del grupo hemo (*rojo*) y se designan los ocho segmentos con α-hélice (A, B, ..., H) así como los cinco segmentos no helicoidales que se encuentran entre los anteriores (AB, CD, ..., GH). La quinta posición de coordinación del Fe (por encima del plano del hemo) está ocupada por una histidina, que constituye el aminoácido 104 de la leghemoglobina. La posición sexta (por debajo del plano del hemo) está vacía (en la leghemoglobina ferrosa desoxigenada) u ocupada por una molécula de O_2 (en la oxileghemoglobina) o de agua (en la leghemoglobina férrica).

trógeno. En 1974 esta hipótesis fue confirmada por ellos en colaboración con el grupo de Jonathan y Beatrice Wittenberg, de la Facultad Albert Einstein de Medicina de Nueva York.

Se resolvía así la "paradoja del O_2". Por tal se entendía lo siguiente: la nitrogenasa, enzima responsable de la fijación de nitrógeno, se inactiva en presencia de O_2 pero, al propio tiempo, necesita de éste para obtener la energía a invertir en la reducción del nitrógeno a amonio. En efecto, la leghemoglobina transporta O_2 a una concentración baja y estable, que permite mantener simultáneamente elevadas las actividades nitrogenasa y respiratoria de los bacteroides; para que este transporte —denominado difusión facilitada— pueda llevarse a cabo, la leghemoglobina debe mostrar una intensa afinidad por el O_2 y encontrarse a alta concentración en el nódulo; asimismo, los bacteroides deben captar y consumir rápidamente el O_2 transportado por la hemoproteína.

La difusión facilitada de O_2 por la leghemoglobina ocurre como sigue. La forma ferrosa de la leghemoglobina presenta una extraordinaria afinidad por el O_2. Así, basta una concentración de O_2 disuelto en el citoplasma de tan sólo 48 nanomolar para que el 50 % de la leghemoglobina se encuentre oxigenada, es decir, convertida en oxileghemoglobina. (Un nanomolar de O_2 disuelto equivale a 32×10^{-9} gramos de O_2 por litro.) Para que la oxileghemoglobina pueda cumplir su misión y ceder fácilmente el O_2 que necesita la cadena respiratoria de los bacteroides, la afinidad por el O_2 de la oxidasa de los bacteroides tiene que ser superior (unas 10 veces) a la afinidad por el O_2 de la hemoproteína.

Pues bien, la leghemoglobina, que se encuentra en forma soluble en el citoplasma, se oxigena en la membrana plasmática de la célula y transporta el O_2 constituida en oxileghemoglobina hasta la membrana de los simbiosomas. Habida cuenta de que el espacio existente entre la membrana del simbiosoma y los bacteroides carece de leghemoglobina, la cesión del O_2 se produce en la membrana del simbiosoma. Dicha cesión se produce aprovechando el fuerte gradiente de O_2 que hay entre la membrana del simbiosoma y los bacteroides, debido a la rápida captación y consumo de O_2 por la oxidasa de éstos.

La cantidad nodular de leghemoglobina presente en forma de oxileghemoglobina puede determinarse por espectroscopía. La leghemoglobina ferrosa (no unida a O_2) manifiesta sus máximos de absorción a 427 y 555 nanómetros, en tanto la oxileghemoglobina los muestra a 411, 541 y 575 nanómetros, y la leghemoglobina férrica tiene un pico característico a 625 nanómetros. Otras técnicas espectrofotométricas, utilizadas para obtener espectros de secciones de nódulos o incluso de nódulos intactos adheridos a la raíz, demuestran que en nódulos jóvenes sólo hay leghemoglobina ferrosa, que en parte se halla convertida en oxileghemoglobina, mientras que en nódulos senescentes o sometidos a estrés aparece, además, una pequeña cantidad de leghemoglobina férrica.

En virtud de esos espectros se ha podido estimar el porcentaje de oxigenación de la leghemoglobina en los nódulos intactos. Este porcentaje es de un 20 a un 30 % para un nódulo de soja de unos 3 milímetros de diámetro, pero puede variar mucho con la especie de leguminosa e incluso con la edad del nódulo. Esa información, unida a la extraída de las reacciones de equilibrio, nos dice que la concentración de O_2 ligado a la forma ferrosa de la leghemoglobina es 50.000 veces superior a la de O_2 libre y que, por consiguiente, todo el O_2 requerido por los bacteroides es transportado por la hemoproteína.

La forma ferrosa de la leghemoglobina se autoxida con facilidad y pasa a la forma férrica en el medio ligeramente ácido de los nódulos. En estas reacciones de inactivación de las leghemoglobinas se hallan implicados los radicales libres. ¿De dónde proceden?

En los nódulos, las principales fuentes de radical superóxido (O_2^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) son la autoxidación de la propia oxileghe-

moglobina y la respiración de mitocondrias y bacteroides. El H_2O_2 no es en sí mismo un metabolito muy reactivo, pero puede actuar como oxidante en las células ya que atraviesa las membranas y origina, en presencia de trazas de metales de transición, radical libre hidroxilo (·OH), que es muy tóxico.

Puede también generarse radical ·OH por ataque del H_2O_2 sobre la oxileghemoglobina; en este caso, el exceso de peróxido rompe el grupo hemo y se libera Fe^{2+} que reduce entonces el H_2O_2 a radical ·OH. El radical ·OH, muy reactivo, tiene una vida media de 1 nanosegundo, por lo que puede atacar prácticamente cualquier tipo de biomolécula: ADN, proteínas y ácidos grasos polinsaturados de las membranas.

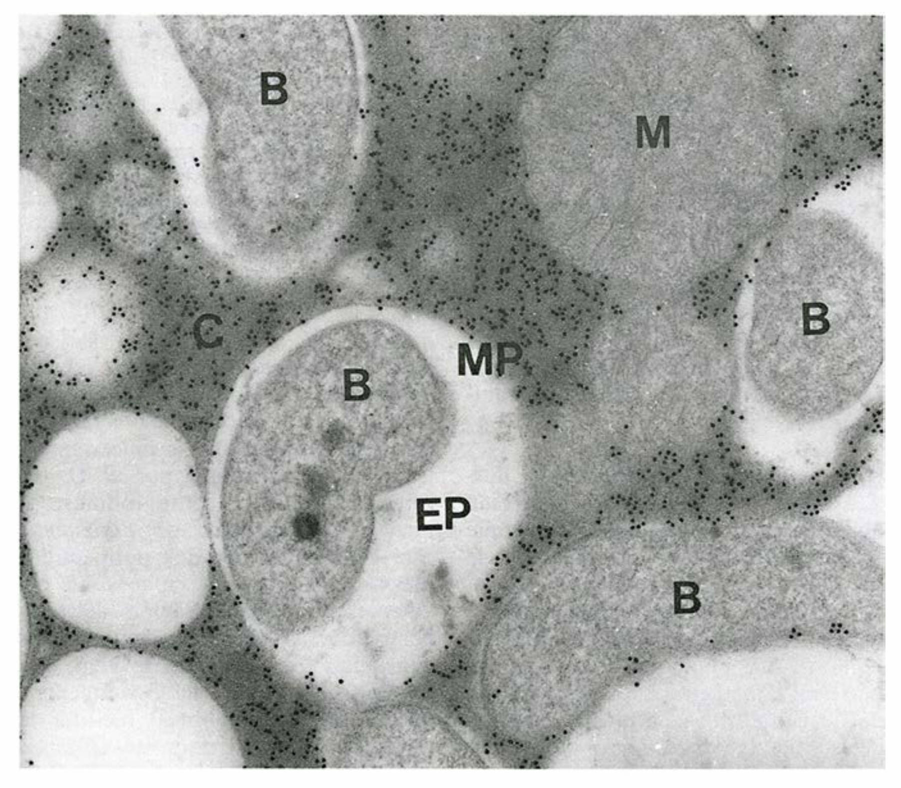
Ahora bien, lo mismo que los tejidos animales y otros tejidos vegetales, los nódulos están dotados de diversos sistemas de protección ("antioxidantes") frente a los radicales libres y el H_2O_2, entre los que cabe señalar la superóxido dismutasa, enzima que convierte ("dismuta") el O_2^- en H_2O_2, y la catalasa y peroxidasa, que destruyen el H_2O_2. No existe ninguna enzima que elimine el radical ·OH puesto que éste es demasiado reactivo, pero las enzimas antioxidantes citadas sí pueden prevenir su formación al destruir el radical O_2^- y el peróxido.

Dada la facilidad con que se oxidan la leghemoglobina ferrosa y la oxileghemoglobina, el hecho de que no se detecte leghemoglobina férrica en los nódulos nos induce a postular que existen *in vivo* mecanismos para mantener la leghemoglobina reducida, es decir, en estado funcional. La hipótesis fue demostrada por Keuk-ki Lee, Linda Shearman, Bob Klucas y el propio autor en la Universidad de Nebraska, utilizando técnicas espectrofotométricas.

Comenzamos por tratar secciones de nódulos de soja con hidroxilamina para oxidar intracelularmente la forma ferrosa de la leghemoglobina a su especie férrica. Tras lavar estas secciones en solución tampón para eliminar el exceso de hidroxilamina, observamos que la forma férrica se reducía de nuevo rápidamente dentro de las células infectadas. Reducción que podía obedecer a distintintos mecanismos. Uno de ellos es la enzima ferrileghemoglobina reductasa. Esta es una flavoproteína de unos 100 kilodalton, constituida por dos subunidades idénticas. Más tarde, el autor demostraría que la leghemoglobina férrica podía ser reducida también a la forma ferrosa por las flavinas en presencia de NADH o NADPH (nucleótidos de piridina que actúan como reductores en gran número de reacciones biológicas). Estos mecanismos, cuya misión es mantener activa la leghemoglobina, y por tanto la fijación del nitrógeno, parecen ser operativos en las condiciones de baja concentración de O_2 de los nódulos.

Un aspecto de la leghemoglobina apenas conocido, no obstante su importancia fisiológica, es el de su vía de degradación en los nódulos. Es probable que se requiera la oxidación previa del grupo hemo, mediada, según lo visto anteriormente, por radicales libres. En la degradación metabólica de la aproproteína intervienen proteasas con gran afinidad por la leghemoglobina, que abundan en los nódulos, sobre todo en los senescentes; entre los productos resultantes de la degradación aparecen dos pigmentos, la coleglobina y la biliverdina. La coleglobina es un derivado con el grupo hemo roto por oxidación, aunque no ha perdido todavía su átomo de hierro, del que sí carece la biliverdina. Estos pigmentos, especialmente la biliverdina, se acumulan durante la senescencia de los nódulos, sea ésta causada por envejecimiento natural o por la aplicación de estrés a la planta. La aparición de los pigmentos de degradación determina un cambio de coloración en los nódulos (de rojo a marrón y posteriormente a verde), el cual resulta muy útil como indicador de la inactivación funcional de la leghemoglobina y, por tanto, de la pérdida de actividad fijadora de nitrógeno.

El análisis de las secuencias aminoacídicas que componen la hemoglobina animal y las leghemoglobinas, sumado al estudio cristalográfico de uno y otro tipo de proteínas, indujo a pensar en un posible origen común. La idea cobró fuerza con la investigación genética de otra hemoproteína animal, la mioglobina. Se vio, en efecto, que el gen de la mioglobina tenía dos intrones y tres, el de la leghemoglobina. (Los intrones, situados entre exones, son fragmentos de ADN sin función codificadora porque son escindidos durante la maduración de éste a ARN mensajero.) La posición de los dos intrones del gen de la mioglobina es exactamente la misma que la de los intrones pri-

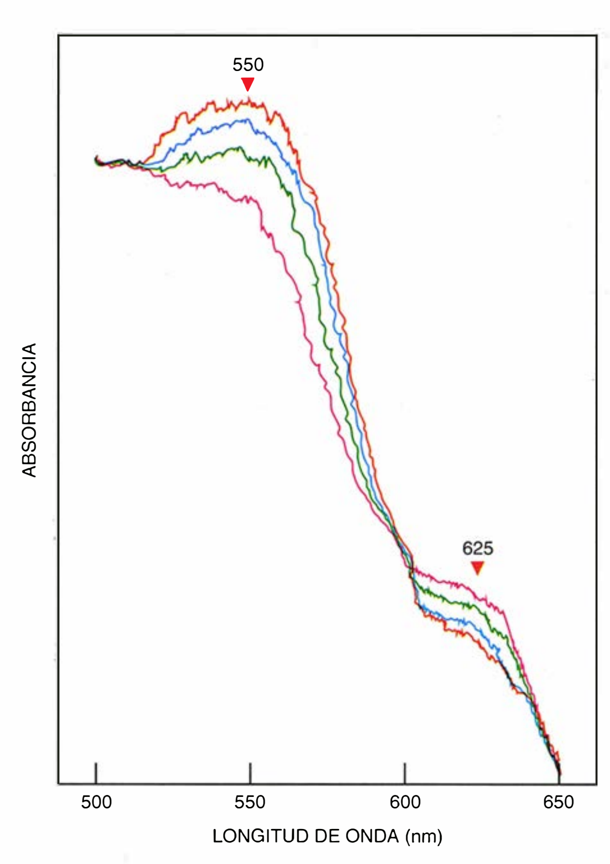


3. LOCALIZACION SUBCELULAR de la leghemoglobina en células infectadas de nódulos de lupino. Las secciones ultrafinas de nódulos se incubaron con anticuerpos anti-leghemoglobina obtenidos de conejo. Estas secciones se trataron después con anticuerpos anti-inmunoglobulina γ de conejo, obtenidos en cabra, conjugados antes con partículas de oro coloidal. Las partículas de oro (*punteado*) señalan la localización de la leghemoglobina. Esta proteína se encuentra en el citosol de las células infectadas y no en los espacios peribacteroidales. (B designa el bacteroide; MP, membrana peribacteroidal o del simbiosoma; EP, espacio peribacteroidal; C, citosol; y M, mitocondria.) Cortesía de M. R. de Felipe.

mero y tercero del gen de la leghemoglobina, un fenómeno que sugiere el origen común de ambos genes, que siguieron una evolución divergente.

El análisis comparativo de las secuencias de las hemoproteínas vegetales y animales remonta el punto de divergencia a unos 1500 millones de años atrás, fecha aproximada en la que, de acuerdo con las pruebas paleontológicas, se produjo la separación de los reinos vegetal y animal. Ahora bien, si la hipótesis fuera correcta, las hemoproteínas tendrían que hallarse en muchas familias de plantas y no sólo en las leguminosas, cuya antigüedad se cifra en unos 100 millones de años.

Para resolver la aporía, se propuso la hipótesis de la *transferencia horizontal*, según la cual el gen de la hemoglobina se transfirió de una vez para siempre de los animales a una leguminosa primitiva. No se cuestionó esa idea, pese a que H. Davenport había descrito ya en 1960 que los nódulos de ciertas plantas contenían un pigmento análogo a la hemoglobina. Pero el descubrimiento de hemoglobinas en plantas de muy diversas familias, sin vínculos evolutivos aparentes, ha acabado por invalidar la hipótesis de la transferencia horizontal. Parece más plausible que dicho gen se heredara por *transferencia vertical*: desde un organismo ancestral común a las plantas y animales vivos.



4. REDUCCION *in vivo* de la leghemoglobina férrica a ferrosa. Se trató una sección de un nódulo de soja con hidroxilamina, un compuesto no biológico que atraviesa la membrana de las células nodulares y que oxida intracelularmente la leghemoglobina ferrosa (oxigenada o no) a leghemoglobina férrica. La sección se lavó después con una solución tampón isosmótica para eliminar el exceso de hidroxilamina y se obtuvieron espectros a tiempo 5, 10, 20 y 35 minutos (espectros rosa, verde, azul y rojo, respectivamente). Se observa la desaparición del pico a 625 nanómetros (forma férrica) y la aparición del pico a 550 nanómetros (forma ferrosa desoxigenada).

Las plantas en que Davenport descubrió el pigmento análogo eran actinorrícicas; se llaman así porque forman nódulos tras la infección de las raíces con un actinomicete del género *Frankia*. Durante los años ochenta, C. Appleby, J. Tjepkema, M. Trinick y sus colaboradores lograron purificar y caracterizar la hemoglobina de *Casuarina*, una planta actinorrícica, y la de *Parasponia*, una ulmácea peculiar que se caracteriza por su capacidad de formar nódulos tras la infección con *Rhizobium*.

La obtención de tales hemoglobinas entrañó gran dificultad, debido a que los nódulos de *Casuarina* y *Parasponia* abundan en fenoles y polifenoloxidasa, enzima que, al ponerse en contacto con el O_2, degrada rápidamente las hemoglobinas. De hecho, la purificación fue sólo posible cuando las proteínas se extrajeron en condiciones estrictamente anaeróbicas. Estas hemoglobinas muestran estructuras y afinidades por el O_2 similares a las leghemoglobinas, si bien la hemoglobina de *Parasponia* está constituida por dos polipéptidos idénticos unidos por enlaces no covalentes. La concentración de tales hemoglobinas en los nódulos y sus constantes de afinidad revelan una función idéntica a la desempeñada por las leghemoglobinas: facilitar la difusión de O_2 al endofito (*Frankia* o *Rhizobium*, respectivamente).

El desarrollo espectacular de las técnicas de inmunología y genética molecular ha permitido rebajar en varios órdenes de magnitud el límite de detección de las proteínas, así como identificar, aislar y comparar los genes que determinan las hemoglobinas. Así, C. Appleby, D. Bogusz, J. Landsmann y W. J. Peacock, de la Organización para la Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth en Australia, sintetizaron el oligonucleótido que determina los aminoácidos 153 a 158 de la hemoglobina de *Parasponia* y lo utilizaron como sonda para detectar fragmentos de ADN homólogos (con una secuencia de bases idéntica o muy similar) en otras especies. Gracias a esta técnica, se ha demostrado que existen secuencias del gen de la hemoglobina en *Trema* y *Celtis*, ulmáceas lo mismo que *Parasponia*, aunque incapaces de nodular. Dichos genes son funcionales (se transcriben a ARN mensajero y éste se traduce a hemoglobina) en las raíces, pero no en las hojas.

La hemoglobina de raíces de *Parasponia* tiene la misma masa molecular que la de los nódulos y viene determinada, al parecer, por el mismo gen; en consecuencia, su afinidad por el O_2 debe ser también similar. Se desconocen los factores que condicionan que el gen de la hemoglobina se transcriba abundantemente en los nódulos y escasamente en las raíces.

Los trabajos de Appleby y Peacock aclararon algo la cuestión. Unieron los promotores de los genes de *Parasponia* y *Trema* con el gen "indicador" GUS. (Los promotores son segmentos de ADN en donde se une la ARN polimerasa y se inicia la transcripción a ARN. El gen GUS codifica la enzima ß-glucuronidasa, cuya actividad puede ser fácilmente cuantificada por fluorescencia y visualizada por técnicas histoquímicas.) Seguidamente, introdujeron los genes quiméricos en la planta del tabaco (*Nicotiana tabacum*) y en una leguminosa, *Lotus corniculatus*. La presencia de los promotores en los genes quiméricos provocó que éstos se expresaran en las raíces de las plantas transgénicas de tabaco, en los nódulos y (si bien a un menor nivel) en el tejido vascular de las raíces de las plantas transgénicas de *Lotus*. Observaron que los promotores de *Parasponia* y *Trema* portaban una secuencia de bases esencial para la expresión específica de los genes en los nódulos.

¿Cuál es el origen de los genes que determinan la hemoglobina en el

5. DEGRADACION del grupo hemo de la leghemoglobina a biliverdina por oxidación y rotura del puente metino α, β, γ o δ. Los códigos de los grupos indican: V, vinilo; M, metilo; y P, propiónico. Los dos grupos propiónico confieren cierta solubilidad a la molécula de hemo en medios acuosos.

tejido no nodular? ¿Qué función desempeñan? Los genes de las hemoglobinas de *Parasponia* y *Trema* tienen los tres intrones situados exactamente en las mismas posiciones que en los genes de las leghemoglobinas, lo que revela un origen común para ambos tipos de genes. Esto, unido al hecho de que la homología entre los genes (exones) de *Parasponia* y *Trema* es del 93 %, y entre los de *Trema* y soja del 49 %, apunta a que el gen de la hemoglobina se encontraba ya en una planta ancestral común a estas dos familias de Angiospermas, tan alejadas desde el punto de vista evolutivo. Otro tanto ocurre cuando se comparan secuencias aminoacídicas de la hemoglobina de *Casuarina* con la de las otras especies.

Las observaciones anteriores hacen altamente improbable que el gen de la hemoglobina se transfiriera varias veces, en el curso de la evolución, del genoma animal al genoma de las diferentes familias de plantas que lo poseen, mientras que confirman la hipótesis de una transferencia vertical. No obstante, para zanjar definitivamente la cuestión deberíamos detectar el gen de la hemoglobina o hallar esta proteína en grupos vegetales muy primitivos: Gimnospermas, Briófitos y Pteridófitos. Aunque esto no se ha demostrado todavía, en 1993 el grupo de Robert Hill, de la Universidad de Manitoba, detectó genes funcionales de hemoglobina en las raíces y semillas de algunas gramíneas (cebada, arroz, trigo y maíz), lo que ratifica la hipótesis de la transferencia vertical del gen de la hemoglobina.

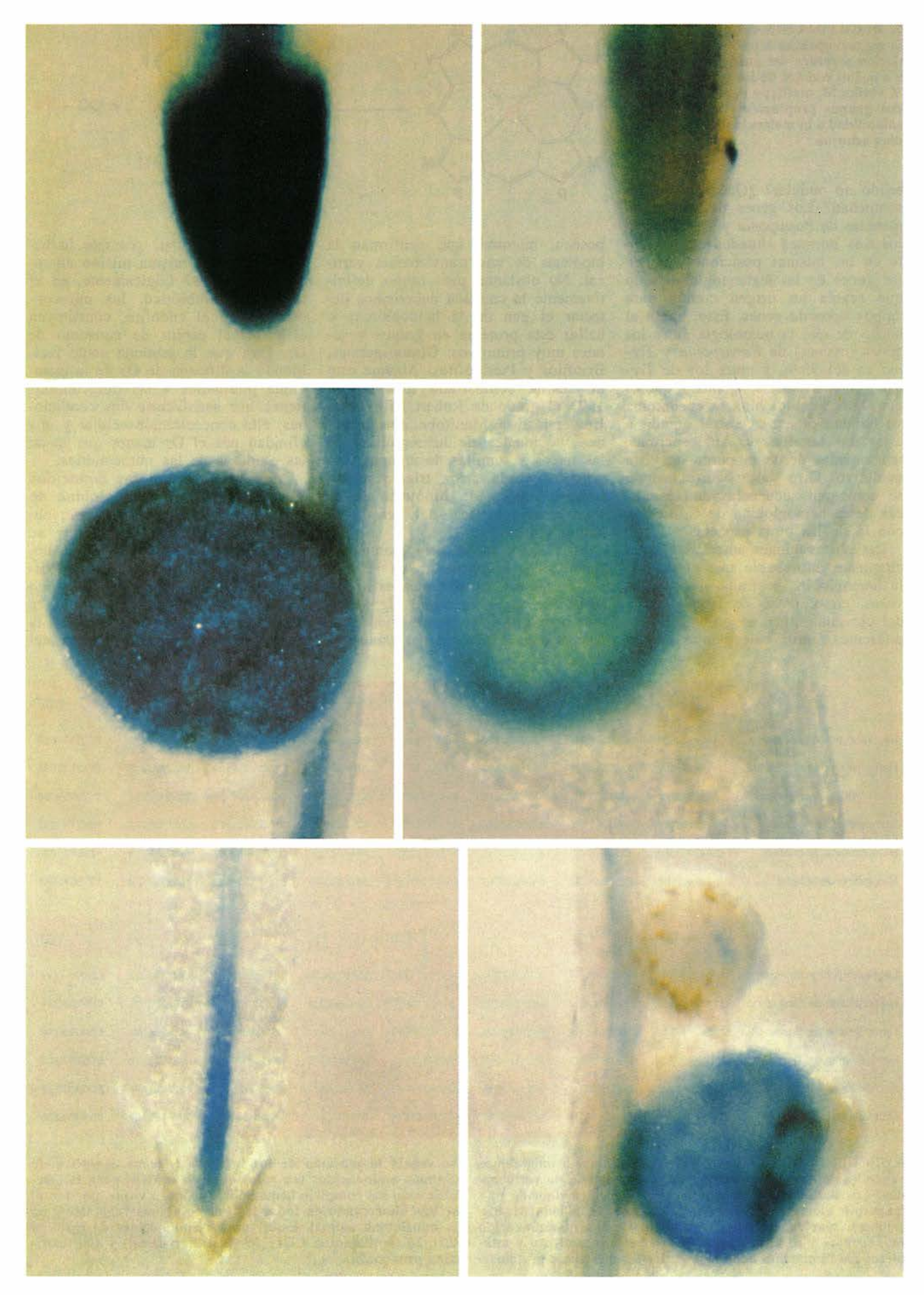
Si el gen de la hemoglobina es funcional y se encuentra en las raíces de plantas tan dispares, es lógico sospechar que debe existir alguna razón para que haya sobrevivido a lo largo de la evolución del reino vegetal. En particular, ¿cumple la hemoglobina una misma misión en todas las plantas? Lógicamente, en el tejido no simbiótico, las mitocondrias, y no el endofito, constituyen el principal centro de consumo de O_2. Para que la proteína actúe facilitando la difusión de O_2 de la membrana plasmática a las mitocondrias tienen que satisfacerse dos condiciones: alta concentración celular y una afinidad por el O_2 menor que la de las oxidasas de las mitocondrias.

A tenor de los datos conocidos o inferidos de la hemoglobina de nódulos y raíces de *Parasponia*, observamos que las condiciones se cumplen para la hemoglobina de nódulos; cabe, pues, que la hemoglobina actúe en este tejido transportando O_2 a los bacteroides. En cambio, la concentración de hemoglobina en la raíz es mil veces inferior a la del

	10	20	30	40	50	60	70	80
Leghemoglobina de soja	++++++VAFT	EKQDALVSSS	FEAFKANIPQ	YSVVFYTSIL	EKAPAAKDLF	SFLAN+GVD+P+	+TNPKLTGHA	EKLFALVRDS
Hemoglobina de *Casuarina*	+++++++ALT	EKQEALLKQS	WEVLKQNIPA	HSLRLFALII	EAAPESKYVF	SFLKD+SNE+IP	ENNPKLKAHA	AVIFKTICES
Hemoglobina de *Parasponia*	SSSEVNKVFT	EEQEALVVKA	WAVMKKNSAE	LGLQFFLKIF	EIAPSAKNLF	SYLKD+SPV+PL	EQNPKLKPHA	TTVFVMTCES
Hemoglobina de *Trema*	SSSEVDKVFT	EEQEALVVKS	WAVMKKNSAE	LGLKFFLKIF	EIAPSAKNLF	SYLKD+SPI+PL	EQNPKLKPHA	MTVFVMTCES
Hemoglobina de cebada	MSSAEGAVVFS	EEKEALVLKS	WAIMKKDSAN	LGLRFFLKIF	EIAPSARQMF	PFLRD+SDV+PL	ETNPKLKTHA	VSVFVMTCEA
Mioglobina de ballena	+++++++VLS	EGEWQLVLHV	WAKVEADVAG	HGQDILIRLF	KSHPETLEKF	DRFKHLKTEAEM	KASEDLKKHG	VTVLTALGAI

	90	100	110	120	130	140	150	160
Leghemoglobina de soja	AGQLKASGTV	VADAA++++L	GSVHAQKAVT	DP+QFVVVKEA	LLKTIKAAVG	DKWSDELSRA	WEVAYDELAA	AIKKA+++++
Hemoglobina de *Casuarina*	ATELROKGHA	VWDNNTLKRL	GSIHLKNKIT	DP+HFEVMKGA	LLGTIKEAIK	ENWSDEMGQA	WTEAYNQLVA	TIKAEMKE++
Hemoglobina de *Parasponia*	AVQLRKAGKV	TVKESDLKRI	GAIHFKTGVV	NE+HFEVTRFA	LLETIKEAVP	EMWSPEMKNA	WGVAYDQLVA	AIKFEMKPSS
Hemoglobina de *Trema*	AVQLRKAGKV	TVRESNLKRL	GAIHFKNGVV	NE+HFEVTRFA	LLETIKEAVP	EMWSPEMKNA	WGEAYDQLVA	AIKSEMKPSS
Hemoglobina de cebada	AAQLRKAGKI	TVRETTLKRL	CGTHLKYGVA	DG+HFEVTRFA	LLETIKEALPA	DMWGPEMRNA	WGEAYDQLVA	AIKQEMKFAE
Mioglobina de ballena	LKKKGH++++	+HEAE+LKLP	AQSHATKHKI	PIKYLEFISEA	IIHVLHSRHP	GDFGADAQGA	MNKALELFRK	DIAAKYKELG

6. SECUENCIA DE AMINOACIDOS de algunas hemoglobinas vegetales de interés evolutivo y de la mioglobina de vertebrados. Los aminoácidos se representan por un código de una letra (por ejemplo: A, alanina; C, cisteína; G, glicina; H, histidina; L, leucina, etcétera). El símbolo + indica un aminoácido no existente y se utiliza para facilitar el alineamiento y establecer así la máxima homología entre las diferentes proteínas. Se señala la posición de los intrones (*flechas azules*) y de algunos aminoácidos (*en rojo*) que son críticos para la estabilización del complejo hemoglobina-oxígeno y que, por tanto, se han conservado en todas las hemoglobinas vegetales y en la mioglobina animal. Estos son los aminoácidos 44 (prolina C2), 50 (fenilalanina CD1), 69 (histidina distal) y 104 (histidina proximal).



FAMILIA	ESPECIE	NOMBRE COMUN	ENDOFITO	TEJIDO
Leguminosae	*Glycine max* *Lupinus luteus* *Pisum sativum* *Sesbania rostrata*	Soja Lupino Guisante ----	*Bradyrhizobium* *Bradyrhizobium* *Rhizobium* *Azorhizobium*	Nódulos radicales Nódulos radicales Nódulos radicales Nódulos radicales y nódulos en tallos
Casuarinaceae	*Casuarina glauca*	----	*Frankia*	Nódulos radicales y raíces
Myricaceae	*Myrica gale*	Mirto de Brabante, arrayán de los pantanos	*Frankia*	Nódulos radicales
	Comptonia peregrina	----	*Frankia*	Nódulos radicales
Betulaceae	*Alnus rubra*	Aliso	*Frankia*	Nódulos radicales
Elaeagnaceae	*Elaeagnus angustifolia*	Arbol del Paraíso	*Frankia*	Nódulos radicales
Ulmaceae	*Parasponia andersonii* *Trema tomentosa* *Celtis australis*	---- ---- Almez	*Brady(rhizobium)* ---- ----	Nódulos radicales y raíces Raíces Raíces
Gramineae	*Hordeum vulgare* *Oryza sativa* *Triticum aestivum* *Zea mays*	Cebada Arroz Trigo Maíz	---- ---- ---- ----	Raíces y semillas Raíces Raíces Raíces

8. FAMILIAS y especies representativas de plantas en las que se han detectado genes que codifican hemoglobinas o sus productos (ARN mensajero y proteínas).

nódulo y, aunque toda la proteína estuviera oxigenada, la concentración de O_2 combinado con ella sería probablemente todavía inferior a la de O_2 libre. Asimismo, la oxidasa de las mitocondrias tiene una afinidad similar a la de la hemoglobina.

A la vista de estos datos, Appleby y sus colegas señalan que la hemoglobina de raíces no puede transportar O_2, a menos que la proteína se concentre en determinados puntos de la raíz. En este sentido, se dispone ya de algunas pruebas de que la hemoglobina pueda concentrarse en la región de crecimiento (meristemática) del ápice de las raíces (quizás en los primeros 2-3 mm). Ese nivel de la proteína, cifrado en 2 micromolar (1 micromolar es la masa molecular de la hemoglobina por una millonésima de gramo por litro) podría bastar para actuar como molécula transportadora de O_2 en el meristemo de la raíz, con células de rápido crecimiento y elevada tasa respiratoria.

7. EXPRESION DE LOS GENES de la hemoglobina en plantas transgénicas de tabaco y *Lotus corniculatus*. La tinción azul se debe a la actividad ß-glucuronidasa, enzima codificada por el gen GUS, que señala la localización de los genes funcionales de las hemoglobinas. En la figura, de arriba abajo y de izquierda a derecha, se ilustran distintas zonas donde se observa actividad ß-glucuronidasa: meristemo y haz vascular de raíz de tabaco; meristemo de raíz de tabaco; zona central de nódulo y haz vascular de raíz de *Lotus*; zona central de nódulo de *Lotus*; haz vascular de raíz de *Lotus*; y nódulo maduro y haz vascular de raíz de *Lotus*. En este último caso se aprecia, además, la escasa tinción de un nódulo muy joven adyacente. Cortesía de la Sociedad Americana de Fisiólogos Vegetales.

Los mismos autores han propuesto otra posible función. Incluso a bajas concentraciones, la hemoglobina podría actuar como un sensor del nivel de O_2. Así, cuando la concentración de O_2 desciende mucho, la hemoglobina se desoxigenaría sustancialmente: sólo un 10 % permanecería como oxihemoglobina; esto podría ser la señal que desencadenara un cambio del metabolismo energético de tipo aeróbico a fermentativo en las células de la raíz. Se sabe, por ejemplo, que tales cambios metabólicos son importantes para que la planta sobreviva en situaciones de anoxia, lo que requiere la inducción de grupos de genes que codifican enzimas específicos de las vías fermentativas, como la alcohol deshidrogenasa. Esta hipótesis ha sido verificada por el grupo canadiense de Hill, al demostrar que los genes de la hemoglobina se expresaban en las raíces de cebada sometidas a anoxia por inundación del suelo. Se comprobó, además, que la expresión de los genes de la hemoglobina era similar a la ya descrita para el gen de la alcohol deshidrogenasa.

En conclusión, mientras que las hemoglobinas de nódulos de leguminosas, así como los de *Casuarina* y *Parasponia*, actúan transportando O_2 a los microorganismos asociados simbióticamente y posibilitando con ello la fijación de nitrógeno, las hemoglobinas de raíces, que se expresan a muy baja concentración, podrían desempeñar una función más general, la de sensores de oxígeno molecular. Esta función explicaría por qué el gen de la hemoglobina está presente en animales y plantas de muy diverso desarrollo evolutivo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENZYMATIC AND NONENZYMATIC MECHANISMS FOR FERRIC LEGHEMOGLOBIN REDUCTION IN LEGUME ROOT NODULES. Manuel Becana y Robert V. Klucas en *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, vol 87, págs. 7295-7299, 1990.

NONLEGUME HEMOGLOBIN GENES RETAIN ORGAN-SPECIFIC EXPRESSION IN HETEROLOGOUS TRANSGENIC PLANTS. D. Bogusz y otros en *Plant Cell*, vol. 2, págs. 633-641, 1990.

A CEREAL HAEMOGLOBIN GENE IS EXPRESSED IN SEED AND ROOT TISSUES UNDER ANAEROBIC CONDITIONS. E. R. Taylor, X. Z. Nie, A. W. Macgregor y R. D. Hill en *Plant Molecular Biology*, vol. 24, págs. 853-862, 1994.

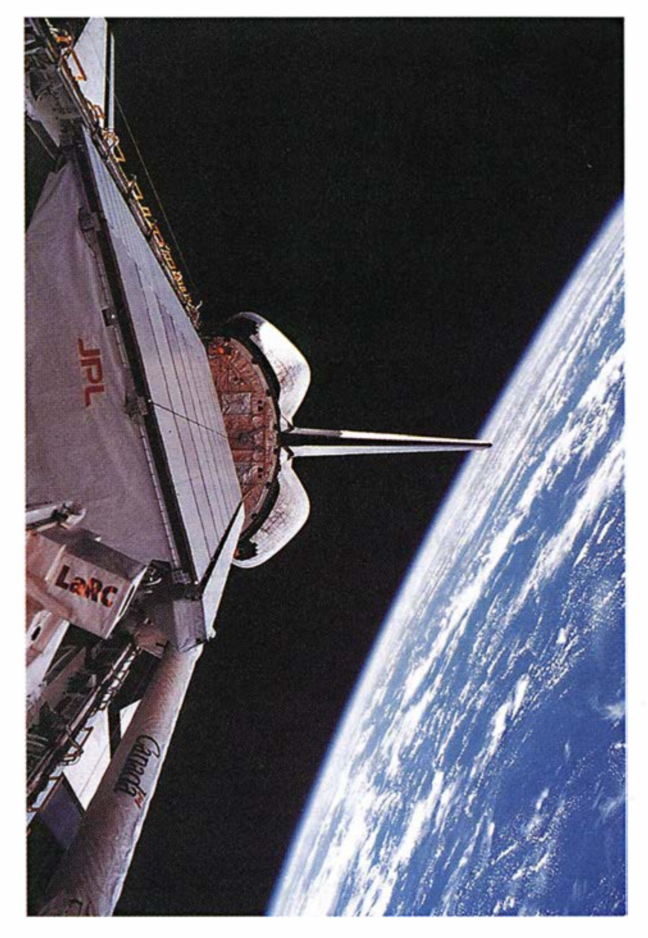
La Tierra vista desde el cielo

Sistemas de radar instalados en la lanzadera espacial Endeavour *proporcionan perspectivas nuevas de nuestro entorno*

Diane L. Evans, Ellen R. Stofan, Thomas D. Jones y Linda M. Godwin

El viernes 30 de septiembre de 1994, al poco de ser lanzada al espacio, la tripulación de la nave espacial Endeavour se encontró con un espectáculo impresionante. El volcán Kliuchevskoi, en Kamchatka, estaba vomitando plumas de cenizas que se elevaban hasta 20 kilómetros en la atmósfera. Tras 49 años, el volcán quiso hacer erupción aquel preciso día. La *Endeavour* llevaba a bordo un refinado sistema radárico, diseñado para estudiar la geología y el ambiente de la Tierra. Tal equipo sólo había volado en una ocasión anterior, en abril del mismo año. El equipo de planificación del radar modificó a toda prisa el programa de trabajo correspondiente a las órbitas siguientes, con el fin de captar en película el pico ardiente.

No fue éste el único fenómeno natural coincidente con el vuelo de la *Endeavour*. El martes 4 de octubre, se desencadenó un terremoto cerca de la isla japonesa de Hokkaido. Horas después, la *Endeavour* pudo escrutar en el litoral los destrozos causados por tsunamis.



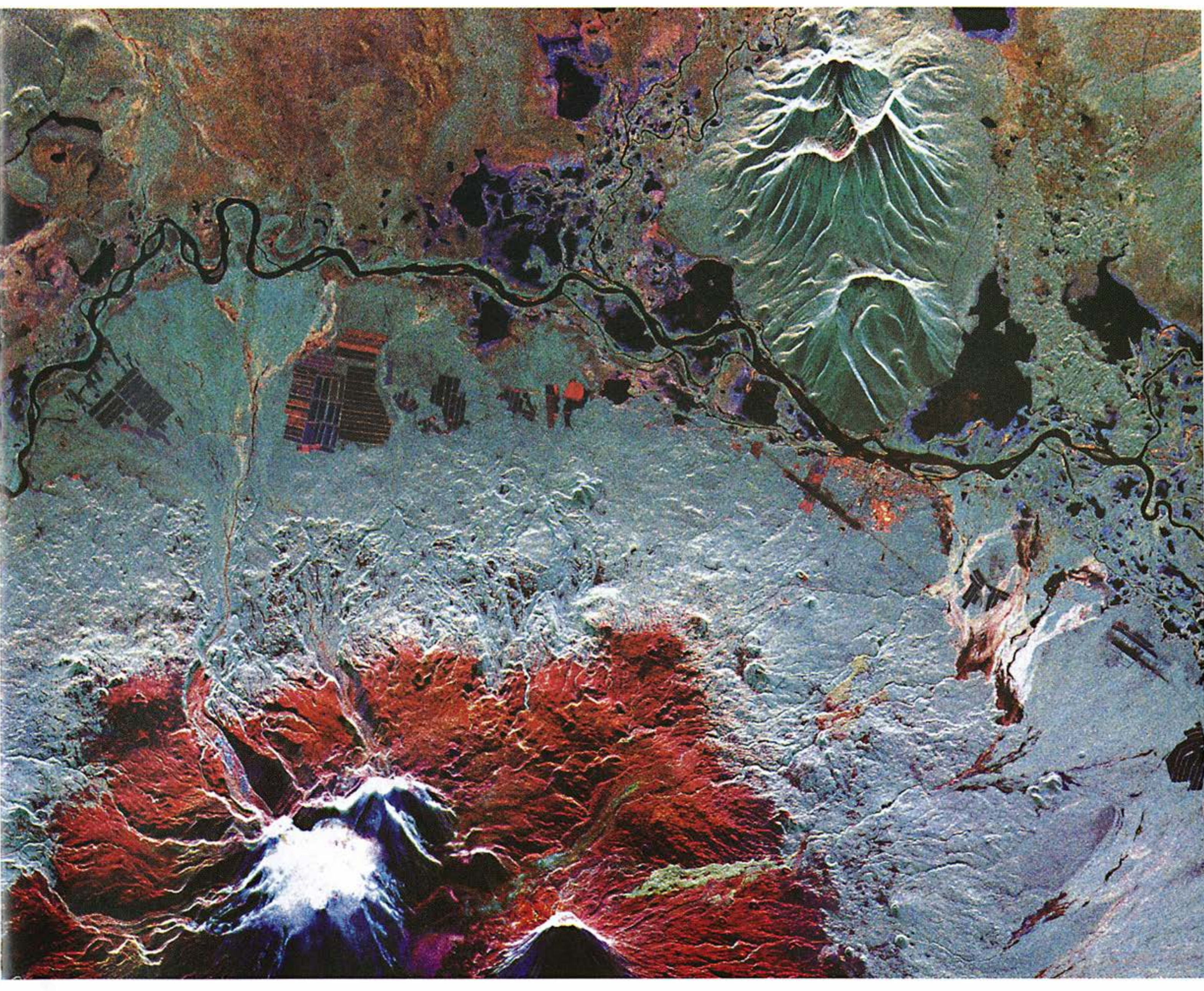
1. LA *ENDEAVOUR*, una lanzadera espacial, examina la Tierra con radar. Pueden verse en la nave los paneles planos de las antenas, que emiten en tres longitudes de onda, los equipos electrónicos necesarios (*JPL*) y un instrumento para la medición desde satélites de la contaminación atmosférica (*LaRC*).

Los sistemas radáricos emiten radiación de longitud de onda relativamente larga, dentro de una gama que va de unos pocos centímetros a varios decímetros, y registran el eco que devuelven las superficies. La comparación de los rayos original y reflejado permite conocer la distancia, el tamaño, la orientación, la rugosidad y otras características del cuerpo reflectante. Los objetos tienden a reflejar aquellas ondas cuya longitud corresponda a su tamaño.

En el caso de que la superficie se encuentre orientada de modo que devuelva directamente el haz de radar hacia su fuente, mostrará, como un espejo, aspecto brillante. Si está orientada en otros ángulos, parecerá oscura. Los rasgos cuyo tamaño sea más o menos de igual escala que la longitud de onda dispersan la radiación en todas direcciones, en lugar de reflejarla de vuelta. Por ese motivo, los campos arados muestran aspecto brillante en radar de corta longitud de onda y son oscuros en las longitudes más largas; los bosques, por otra parte, brillan en la mayoría de las longitudes de onda. Y mientras que las longitudes de onda grandes pueden atravesar sin dificultad un huracán, una pequeña longitud de onda puede darnos detalles del núcleo de una borrasca.

En la construcción de los sistemas de radar instalados en la *Endeavour*, colaboraron científicos norteamericanos y europeos. Hemos utilizado tres longitudes de onda, de tres, seis y 24 centímetros, denominadas, respectivamente, banda X, banda C y banda L. Las radiaciones de las dos longitudes de onda más largas fueron emitidas por el instrumento denominado SIR-C (Radar-C de Imagen Espaciotransportado). Este equipo y el correspondiente procesador de datos fueron desarrollados por científicos del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), en Pasadena, centro donde se recoge y estudia la información.

La radiación de SIR-C está polarizada, con lo que su campo eléctrico vibra o bien en dirección vertical o bien en dirección horizontal. Los rayos reflejados pueden ser recibidos vertical u horizontalmente polarizados, lo que



2. EL VOLCAN KLIUCHEVSKOI (*región roja*) que se encuentra en Kamchatka, en Rusia, hizo erupción el 30 de septiembre. Importantes erupciones recientes acontecieron en 1737 y en 1945. El río Kamchatka (*arriba*) fluye a través de esta región inestable, en la que la placa del Pacífico se hunde bajo la placa eurasiática. Al norte del río se encuentran volcanes inactivos (*verde*); al sur, asentamientos agrícolas (*líneas*). Las venas (*amarillo-verdoso*) de las laderas del Kliuchevskoi indican nuevos flujos de lava. Para tomar esta imagen, que cubre unos 30 por 59,5 kilómetros, la radiación transmitida estaba polarizada horizontalmente. La radiación de banda L (longitud de onda: 24 centímetros) se recibió horizontalmente y se polarizó verticalmente; se las denomina, respectivamente, LHH (*rojo*) y LHV (*verde*). También se muestra la componente polarizada verticalmente, llamada CHV (*azul*), de la radiación reflejada de banda C (longitud de onda: 6 centímetros.)

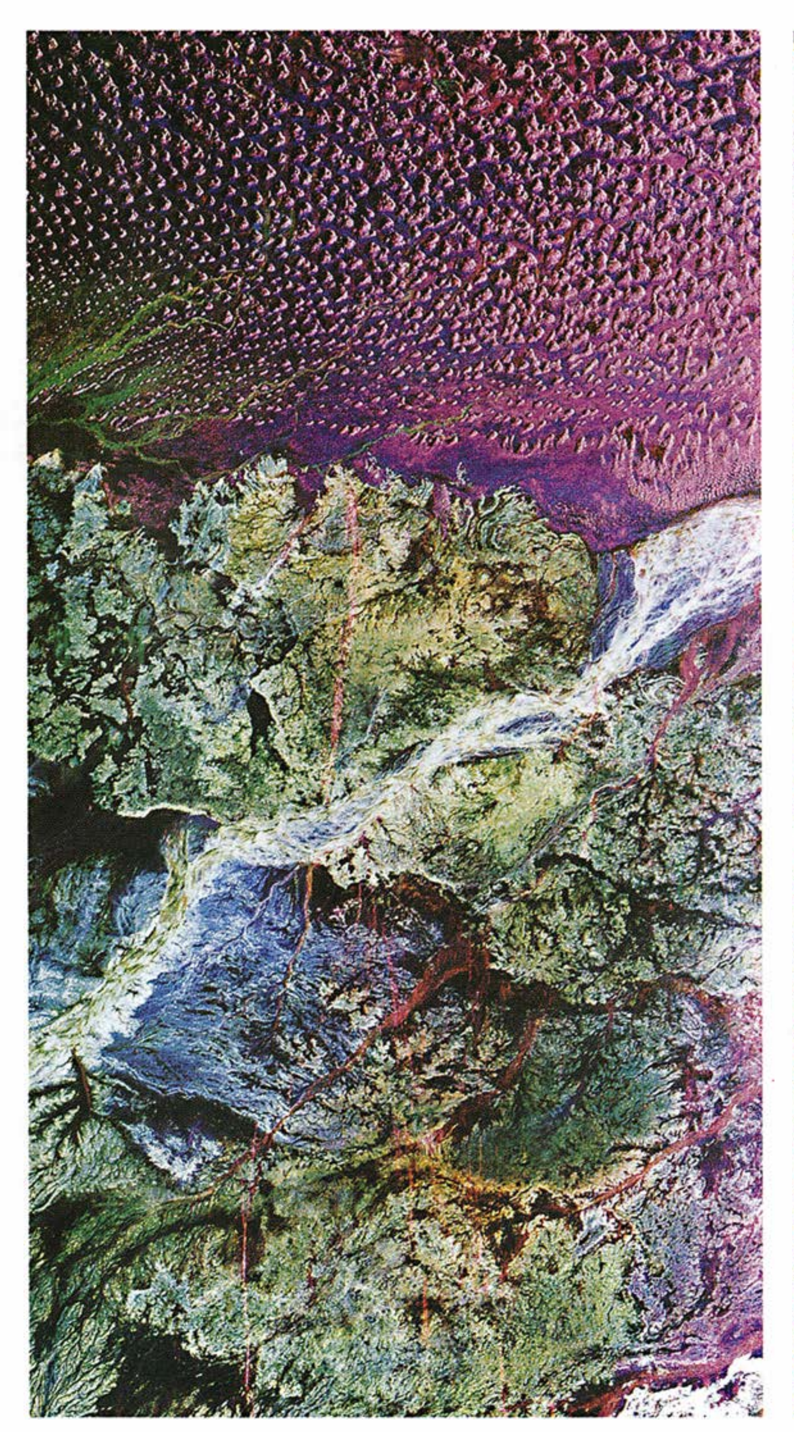
DIANE L. EVANS, ELLEN R. STOFAN, THOMAS D. JONES y LINDA M. GODWIN colaboraron en distintas facetas de los vuelos de la sonda *Endeavour*, en abril y octubre de 1994. Evans, adscrita al Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de Pasadena, trabajó en el diseño del radar SIR-C. Doctorada en geología por la Universidad de Washington, dirige investigaciones en detección remota. Stofan, del grupo experimental del SIR-C, se especializó en geología de Venus en la Universidad Brown y colabora ahora en la misión Magallanes. Jones fue tripulante de la *Endeavour* en ambos vuelos. Se graduó en 1977 en la Academia de la Fuerza Aérea, prestando servicio en ella durante seis años. Interesado por las ciencias planetarias, se doctoró por la Universidad de Arizona en 1988. En 1991 se hizo astronauta. Godwin, jefa delegada de la Oficina de Astronautas de la NASA, actuó de especialista de la misión en el vuelo de abril de la *Endeavour*, que fue su segunda visita al espacio. Es física especializada en materia condensada.



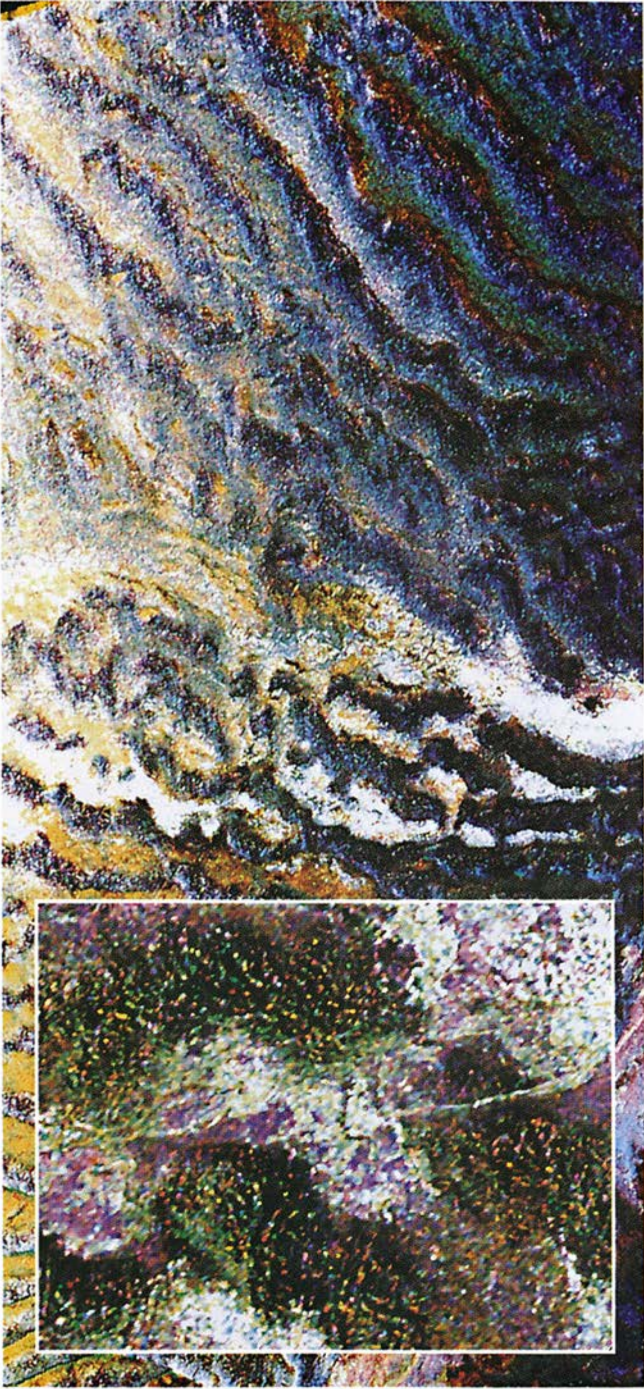


3. LA EXTINCION DE LOS DINOSAURIOS, hace 65 millones de años, pudo tener relación con el cráter Chicxulub, en Yucatán. El cráter, de impacto meteorítico, está cubierto por una capa caliza, de 300 a 1000 metros de espesor, pero la disposición de las fracturas y el flujo de las aguas revelan la estructura del cráter. A la izquierda hay manglares (*banda amarilla y rosada*). Los lunares (*azul*) indican bosques tropicales regados por manantiales, cuya abundancia es máxima cerca del borde del cráter, que corre de abajo arriba por el centro de la imagen. Los datos de la *Endeavour* pueden facilitar la determinación del diámetro del cráter (entre 180 y 280 kilómetros), cuestión muy debatida. (La potencia total en banda L aparece en rojo; la total en banda C, en verde; y la diferencia entre las bandas C y L, en azul.)

4. AUN QUEDAN GORILAS de montaña en el bosque de bambúes (*arco verdoso, en el centro*) de las laderas del monte Karisimbi (4500 metros). Sus cumbres vecinas son Sabinyo (3650 metros) y Muhavura (más de 4000 metros). Estas cimas pertenecen a la cadena volcánica de los Virunga, que corre a lo largo de las fronteras de Ruanda, Zaire y Uganda. Los volcanes amenazan la ciudad zaireña de Goma y los campos próximos de refugiados ruandeses (*blanco*) que se han instalado recientemente en las orillas del lago Kivu (*mancha negra de la parte superior de la ilustración*). Se emplean mapas similares para cartografiar la vegetación. Tales mapas podrían resultar, sin duda, de importancia crítica para facilitar la supervivencia de los últimos gorilas de montaña. (56 por 32 kilómetros; LHV rojo, CHH verde, CHV azul.)

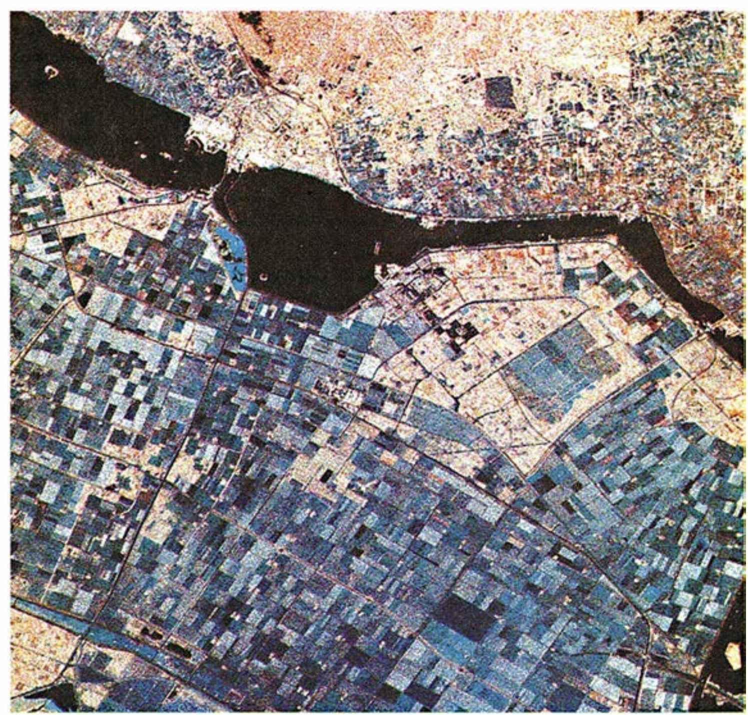


5. LA CIUDAD PERDIDA de Ubar, en el sur de Omán, fue descubierta en 1992 con ayuda del *LANDSAT*. En los datos originales, la ciudad propiamente dicha es demasiado pequeña para aparecer en esta imagen tomada por la *Endeavour*. Pero las venas (*rosa*) que se aprecian justo debajo del uadi, viejo lecho del río (*franja blanca*), revelan carreteras ocultas convergentes hacia el lugar. Ubar, ciudad encantada de *Las mil y una noches*, era un fuerte fronterizo en decadencia, donde se agrupaban las caravanas que transportaban cargamentos de incienso a través del desierto. Durante mucho tiempo fue tenida por mítica; floreció entre 2800 a. de C. y 300 d. de C. Al norte del uadi se ven dunas arenosas (*morado*); al sur tenemos rocas de caliza desnuda (*verde*). (50 por 100 kilómetros; LHH rojo, CHH azul, LHV verde.)



6. LA RUTA DE LA SEDA pudo haber atravesado este rincón del desierto de Taklamakan, en la provincia china de Xinjiang, en el camino hacia Persia, Bizancio y Roma. Se cree que la imagen contiene las ruinas de Niya, un antiguo asentamiento. La franja blanca (*en el centro*) es el río Niya, que corre entre dunas y cerros (*azul*). La ampliación (*recuadro*) revela un rasgo lineal, un canal artificial que se separa del río. Las imágenes de desiertos y dunas, como ésta, pueden contribuir a la predicción de tormentas de arena. (35 por 82 kilómetros; CHH rojo, LHH verde, LHV azul.)

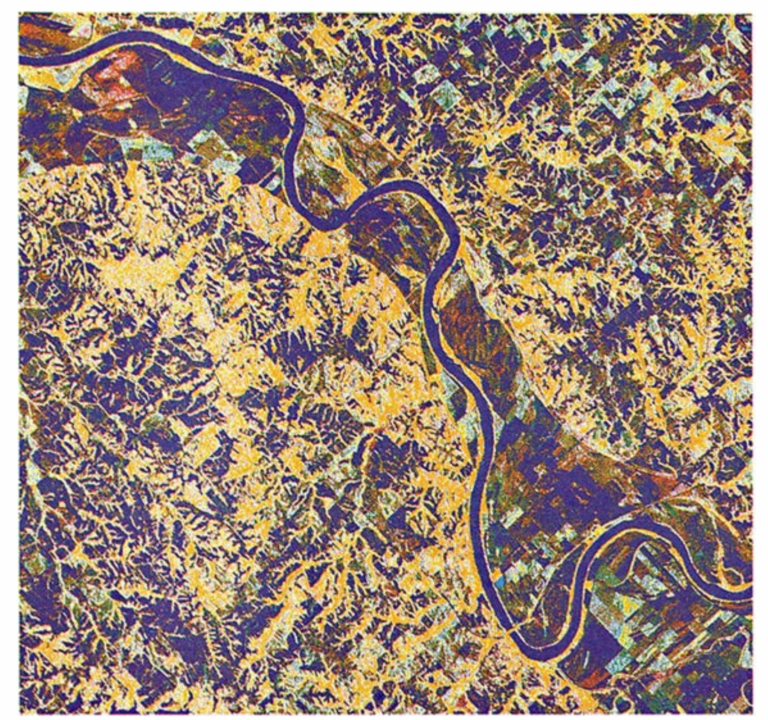




7. TIERRAS ROBADAS al mar en Flevoland, Holanda, dedicadas a la agricultura y bosques. Esta imagen muestra campos pelados (*azul*). Por encima del canal (*negro*) se encuentra un antiguo bosque (*rojo*); a orillas del canal está la ciudad de Harderwijk (*blanco*); las motitas del canal son barcos. Las imágenes de este tipo ayudan al estudio del estado de suelos y cosechas. El pentágono (*ángulo inferior derecho*) es un reflector utilizado para calibrar el radar. (25 por 24 kilómetros; total en banda L, rojo; total en banda C, verde; banda X polarizada y recibida verticalmente, representada en azul.)

8. LAS CRECIDAS DEL AMAZONAS (*amarillo y rojo*), tomadas en abril, han retrocedido desde entonces. El río Negro (*arriba, azul*) y el río Solimões (*abajo*) se encuentran algunos kilómetros aguas abajo y forman el Amazonas. Puede verse una carretera (*línea fina en el centro*) que conecta una porción deforestada (*azul*) en la selva (*verde*) con un tributario del río Negro. Los investigadores se valen del radar para medir la extensión de las zonas anegadas o deforestadas y la biomasa de los bosques. Con tales datos pueden deducir la fijación de dióxido de carbono, esencial en los estudios de calentamiento global. (8 por 40 kilómetros; LHH rojo, LHV verde, LVV azul.)





9. LOS TEMPANOS (*en marrón y blanco*) **que flotan en las marejadas del mar de Weddell, en la Antártida, crean esta imagen rugosa. Tramos de aguas abiertas** (*azul*) **albergan zonas de formación de nuevos hielos** (*jirones negros*)**. Los hielos marinos frenan el flujo térmico desde el océano, caliente, hacia la atmósfera, fría, afectando así al sistema climático global. El radar revela no sólo el espesor del hielo, sino también la energía y las interacciones de las olas. Resulta especialmente útil en las regiones polares, caracterizadas por largos períodos de oscuridad y una extensa cobertura nubosa. (100 por 30 kilómetros; LHV rojo, LHH verde, CHH azul.)**

10. LA ROTURA DE LOS DIQUES durante las riadas que sufrió el Medio Oeste de los Estados Unidos en 1993 provocó la deposición de varios metros de arena (*azul*) **en los cultivos de las riberas del Missouri, cerca de Glasgow. Estos campos pueden acabar formando lodazales permanentes. Pueden verse algunas brechas justo debajo del brusco recodo** (*arriba, centro*)**. El terreno está cruzado en zigzag por badenes y hondonadas provocados por las crecidas** (*amarillo*)**. La** ***Endeavour*** **pudo examinar las crecidas de abril de 1994 precisamente cuando desolaban ciertas zonas de Illinois. El radar mide la humedad del suelo o de la nieve (como en la Sierra Nevada de California) y puede contribuir a la gestión de recursos hidráulicos. (37 por 25,5 kilómetros; LHH rojo, LHV verde, inverso de LHH+LHV, azul.)**

nos proporciona otro medio más de discriminación. Así, las ramas verticales de los árboles pueden reflejar mejor una de las polarizaciones que la otra, lo que permite distinguir diferentes tipos de vegetación.

El otro radar, llamado X-SAR ("radar de apertura sintética en banda X"), opera a tres centímetros, emitiendo y recibiendo sólo luz polarizada verticalmente. Fue desarrollado por el Instituto Aeroespacial alemán y por las compañías Dornier en Alemania y Alenia Spazio en Italia.

En sus vuelos de abril y de octubre, la órbita de *Endeavour* tenía una inclinación de 57 grados respecto al ecuador. Merced a un leve corrimiento de su órbita en pasadas sucesivas —*Endeavour* invertía 90 minutos en cada una— acabó obteniendo imágenes del 12 por ciento del planeta. Se enfocó el radar sobre varios centenares de puntos, seleccionados por los 52 equipos científicos.

La tripulación ensayó también una nueva técnica de obtención de mapas topográficos. La radiación se emite en fase (como si se tratase de un láser). La fase de la onda de retorno se detecta mediante dos antenas separadas, o bien en dos pasadas levemente desplazadas de la lanzadera. Las diferencias de fase registradas en los dos casos dependen de la distancia del objeto cuya imagen se desee. Tales métodos interferométricos han revelado que entre los meses de abril y octubre se han producido cambios en la topografía de California y de Hawai, a pesar de que las alteraciones eran de centímetros.

El grueso de los datos no se entregó al JPL hasta que la lanzadera aterrizó. Pero la tripulación transmitió directamente algunas imágenes, acompañadas de comentarios. Esta descripción verbal, juntamente con más de 20.000 fotogramas de película, es de incalculable valor para interpretar los datos. Al cubrir un área mucho mayor que las pasadas del radar, proporciona contexto. Ha contribuido ya a explicar anomalías como las regiones umbrosas de las imágenes en las bandas X y C tomadas durante lluvias intensas en el Amazonas.

La *Endeavour* aterrizó el 11 de octubre de 1994, tras haber permanecido en órbita un día más de lo previsto, para concluir todas sus tareas. Confiamos, merced a las imágenes tomadas, poder averiguar qué combinaciones de longitud de onda y polarización radárica resultarán óptimas en futuros estudios. Lanzado a bordo de un satélite, tal sistema de radar podría llegar a ser fuente permanente de información sobre el estado de los bosques, los ríos y el clima de la Tierra, así como de posibles catástrofes: terremotos, volcanes o riadas.

Ciencia y sociedad

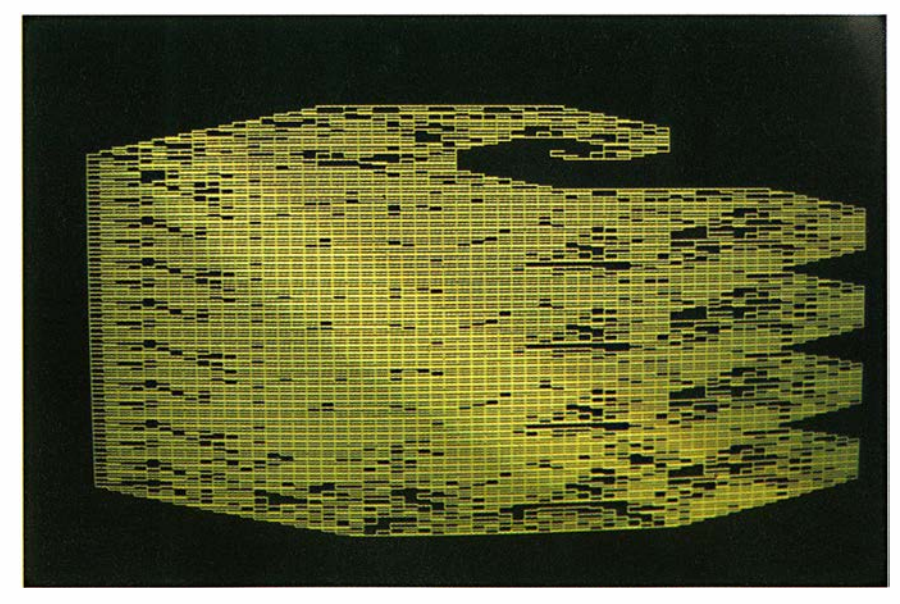
Fractales

Gramaticales

Desde que Benoit B. Mandelbrot ideó en 1975 el término *fractal* para denotar ciertas curvas con propiedades especiales (contener copias de sí mismas, no ser derivables en ningún punto, tener una dimensión de Hausdorff mayor que su dimensión geométrica), los fractales han proliferado mucho y se han aplicado a campos que inicialmente nadie habría podido imaginar. No se trata sólo de que estas curvas monstruosas (algunas ya conocidas desde hace tiempo por los matemáticos, como los "copos de nieve" de von Koch o las curvas de Peano y Hilbert) se adapten mejor que las curvas clásicas a la descripción de las formas que aparecen espontáneamente en la naturaleza. Recientemente han surgido aplicaciones (la teoría del caos o la compactación de imágenes digitalizadas) que prometen ser espectaculares.

Existen varios métodos que permiten generar fractales. Un ejemplo clásico es el conjunto de Mandelbrot, que se define como el límite entre los dominios de convergencia y divergencia de procesos iterativos. También se obtienen aplicando una transformación recursiva a una figura inicial. A tenor de la transformación aplicada, pueden obtenerse fractales deterministas, aleatorios, simples, complejos o caóticos. Por último, la simulación del movimiento browniano también produce fractales, de notable parecido con paisajes reales.

Es curioso que un concepto que apareció en un campo totalmente distinto, el de las gramáticas generativas, ideadas por Noam Chomsky en los años cincuenta y hoy aplicadas al estudio de los lenguajes, naturales y artificiales, haya resultado ser muy útil para la representación esquemática simple de los fractales. En 1968, Aristid Lindenmayer definió un nuevo tipo de gramáticas (*los sistemas de derivación en paralelo*, *sistemas de Lindenmayer* o *sistemas L*) que difieren de las gramáticas ordinarias de Chomsky porque las reglas gramaticales no se aplican secuencialmente (una a una), sino en paralelo (muchas reglas a la vez). Los sistemas *L* se han aplicado con éxito en la simulación de procesos biológicos, como el crecimiento de las plantas, la pigmentación de las conchas de los caracoles, el crecimiento de los cuernos de los mamíferos, la formación de heterocistos en las cianobacterias, y muchos más.



Algunos fractales obtenidos mediante gramáticas de derivación en paralelo son curiosamente semejantes a formas reales. El de la fotografía, que se parece mucho a una mano humana, ha sido generado por el sistema de Lindenmayer

Se observará que ambos (las curvas fractales y los sistemas *L*) coinciden en facilitar la representación de las formas naturales (la línea de una costa o el aspecto de un animal o de una planta). Por ello, durante los años ochenta, se llegó a la conclusión de que uno de ellos podría representar al otro. Y, dado que el estudio clásico de los fractales lleva una carga matemática a veces considerable, mientras que las gramáticas generativas y, especialmente, los sistemas *L*, parecen mucho más asequibles y descriptivos, se procuró describir los primeros con ayuda de los segundos.

Los sistemas *L* más sencillos (sistemas *D0L*), independientes del contexto y deterministas, constan de un alfabeto, un conjunto de reglas gramaticales de producción y una palabra inicial o axioma. Aplicando simultáneamente al axioma todas las reglas posibles, se genera una palabra nueva. El proceso se repite con las palabras generadas, hasta obtener un número finito o infinito de palabras, que en conjunto constituyen el *lenguaje* asociado al sistema *L*.

Para representar fractales mediante sistemas *L*, hace falta algo más: una interpretación gráfica, que permita pasar de las palabras del lenguaje al dibujo del fractal correspondiente. Existen dos tipos principales de interpretación gráfica: vectorial y *tortuga*. En el primero, a cada símbolo del alfabeto se le asocia un vector en un sistema de coordenadas cartesianas rectangulares. Una palabra se dibuja concatenando los vectores de cada una de sus letras o símbolos. Todos los vectores asociados a los símbolos del alfabeto dan lugar a líneas visibles, y la representación gráfica de cada palabra generada por el sistema *L* es un conjunto de segmentos rectilíneos conectados entre sí. El fractal es el límite de la sucesión de gráficos, cuando el número de palabras tiende a infinito.

En los gráficos *tortuga*, ideados por Seymour Papert en 1980, el gráfico es el rastro que va dejando una tortuga invisible, que en cada momento se encuentra en un estado determinado, definido por su posición en un punto concreto y por la dirección hacia donde mira. La tortuga puede cambiar de estado, ya sea

avanzando una unidad de distancia o modificando la dirección sin cambiar de posición. Estos gráficos se utilizaron ampliamente en el lenguaje de programación LOGO.

En la interpretación más sencilla del tipo tortuga, el alfabeto de un sistema *D0L* contiene sólo tres símbolos: la letra **F** y los signos + y –. A una palabra generada por el sistema *L* se le asigna el dibujo obtenido aplicando a cada letra de la palabra las tres reglas siguientes:

F La tortuga avanza una unidad en la dirección definida por el estado en que se encuentra.
+ La tortuga gira en sentido positivo un ángulo elemental α.
– La tortuga gira en sentido negativo un ángulo elemental α.

Complicando la interpretación gráfica, tanto la vectorial como la de tortuga, es posible obtener diversas familias de fractales. Por ejemplo, pueden introducirse letras adicionales en el alfabeto, con funciones gráficas propias; añadiendo paréntesis, se obtienen fractales ramificados; otros símbolos representan colores, o definen figuras rellenas. También puede partirse de sistemas *L* más complejos (sistemas con tablas, o no deterministas, todos ellos definidos por Lindenmayer) para obtener curvas fractales aleatorias y otras más complejas aún.

Algunos autores han propuesto añadir nuevas extensiones a los sistemas *L*, con objeto de ampliar el tipo de fractales que pueden representar. En nuestra opinión, es mejor dejar los sistemas *L* como están y modificar únicamente la interpretación gráfica. Hasta ahora, los sistemas *L* clásicos nos han permitido obtener todos los fractales supuestamente imposibles de representar, variando dicha interpretación.

También nos hemos planteado hasta qué punto las dos interpretaciones gráficas mencionadas (vectorial y tortuga) son equivalentes entre sí. Dicho de otro modo: dado un fractal representado por un sistema *L* con interpretación tortuga, ¿podemos asegurar que existe algún sistema *L* (generalmente distinto) con interpretación vectorial, que también lo represente, y viceversa? Hemos dedicado algunos esfuerzos a resolver este problema y hemos alcanzado la conclusión de que la respuesta es afirmativa, si se desea pasar de la interpretación tortuga a la vectorial, siempre que se cumplan ciertas condiciones no demasiado restrictivas. Además de demostrar el teorema correspondiente, hemos desarrollado un algoritmo que permite pasar automáticamente, de un sistema *L* con interpretación tortuga que cumpla las condiciones previstas, a otro sistema *L* con interpretación vectorial, gráficamente equivalente al primero, lo que significa que dibuja la misma curva fractal.

Con todo esto, aún no se ha hecho más que arañar la superficie de las posibilidades, pues casi toda la investigación realizada hasta el momento se ha limitado a los sistemas *L* independientes del contexto.

MANUEL ALFONSECA MORENO
ALFONSO ORTEGA DE LA PUENTE
Universidad Autónoma de Madrid

Ornitomimosaurio

Hallado en Cuenca

Los dinosaurios son tetrápodos terrestres. Bajo su común denominación se amparan formas de muy diferentes tamaños y organizaciones estructurales, lo que constituye una primera indicación de la pluralidad de nichos ecológicos. La primera gran división parte los dinosaurios entre saurisquios y ornitisquios. Estos últimos se diferencian por la estructura y orientación del pubis y la aparición de un hueso predentario, principalmente. El grupo de los saurisquios se subdivide, a su vez, en sauropodomorfos y terópodos. Los segundos son las formas carnívoras, típicamente bípedas, un carácter probablemente retenido de la condición presente en el ancestro común de todos los dinosaurios.

Dentro de los terópodos uno de los grupos más populares son los ornitomimosaurios, animales bípedos de dimensiones medias (de 2 a 5 metros de longitud y hasta 2 de altura), dotados de extremidades gráciles, largos cuellos y cráneos livianos con pico.

Durante el transcurso de 1993 se hallaron en el yacimiento de Las Hoyas (Cuenca) restos de un ornitomimosaurio hasta entonces desconocido en el registro fósil. El nombre propuesto para el mismo es *Pelecanimimus polyodon* ("imitador del pelícano con muchos dientes"). El descubrimiento encierra un triple interés: paleontológico, patrimonial y sociocultural. Entre el material desenterrado está el primer cráneo completo de dinosaurio hallado en España.

La mayoría de los ornitomimosaurios que conocemos pertenecen al final del Cretácico (Campaniense-Maastrichtiense, transcurrido entre 83 y 65 millones de años antes de la actualidad). El género *Garudimimus*, hallado en Mongolia, es anterior (entre 95 y 88 millones de años). Algunos creen que *Elaphrosaurus* (procedente del Jurásico superior de Tanzania, con una antigüedad en torno a los 140 millones de años) es el ornitomimosaurio más antiguo, si bien su adscripción a este grupo parece poco probable.

Pelecanimimus representa el registro fiable más antiguo que se conoce de este grupo de dinosaurios terópodos. Corresponde al Barremiense, en el Cretácico inferior, y se le cifra una edad de 115 millones de años. Su hallazgo permite suponer que los primeros ornitomimosaurios aparecieron entre finales del Jurásico y principios del Cretácico, en un intervalo que abarcaría de 140 a 100 millones de años. Las razones que explican el registro predominantemente finicretácico de los ornitomimosaurios constituyen todavía un enigma. Parece poco probable que pueda invocarse un incremento del número de individuos presente en los ecosistemas continentales durante el transcurso del Cretácico. En cambio, la gracilidad de todo el sistema esquelético de los ornitomimosaurios puede ser considerada como un factor decisivo de ponderación en el registro de este grupo.

Todos los ornitomimosaurios se han encontrado en sedimentos procedentes de antiguos lagos y ríos, como es el caso de *Pelecanimimus*. Sus restos se han conservado en calizas de un paleolago tropical o subtropical, cuya zona más profunda llegó a tener casi medio kilómetro cuadrado de extensión. Los fósiles que contienen estos depósitos y los sedimentos adyacentes dan una idea del entorno biótico donde vivía el ornitomimosaurio de Cuenca. El tapiz vegetal incluía grandes helechos arborescentes, cícadas, coníferas y primitivas plantas con flores. La comunidad de animales terrestres de la que formaba parte *Pelecanimimus* comprendía dinosaurios depredadores mayores que él, iguanodóntidos y saurópodos. Además, los bosques de la ribera del lago de Las Hoyas estaban poblados por cocodrilos, lagartos, salamandras, escarabajos, cucarachas, libélulas, arañas, moscas, termitas y otros muchos grupos.

¿Qué papel ecológico desempeñaba *Pelecanimimus* en este entorno? No es fácil contestar. La paleoecología de los ornitomimosaurios es asunto harto controvertido. Ateniéndonos a los datos esqueléticos podemos inferir que fueron excelentes corredores, dotados de gráciles extremidades posteriores y una larga cola que les pudo servir de órgano estabilizador y timón. Poseían un cuello flexible y móvil. La ligereza de la construcción



Restos fósiles de Pelecanimimus polyodon, *antes de la preparación para su estudio. El espécimen nos ha llegado conservado en tres placas, cada una de ellas con placa y contraplaca, según es habitual en los fósiles desenterrados en Las Hoyas; por ese motivo el animal aparece seccionado sagitalmente. En la placa de la izquierda de la fotografía se puede observar la mano y parte del antebrazo derechos. En la placa central aparece el resto del brazo derecho y parte del izquierdo, los huesos de los hombros, costillas, el esternón y gran parte de las series vertebrales dorsal y cervical. Y, por último, en la placa de la derecha, se observa el resto de la serie cervical y el cráneo completo*

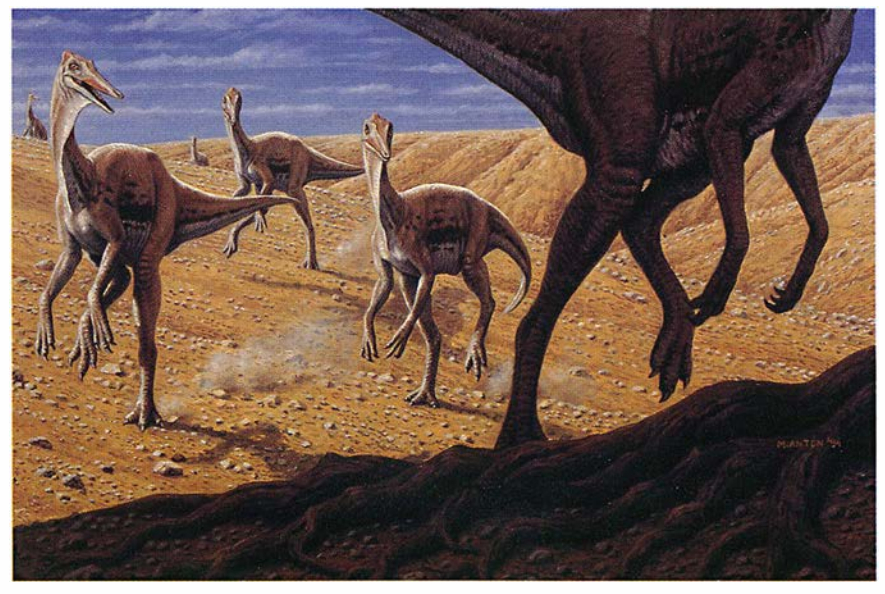
craneal, la situación de las órbitas (laterales, propias de un animal que tiene que vigilar activamente su entorno inmediato) y la morfología no curvada de las garras de la mano parecen desechar un hábito depredador (entiéndase aquí este término como cazadores de presas de un tamaño similar al suyo propio).

La mayoría de los ornitomimosaurios carecían de dientes, condición que dificulta todavía más la investigación relativa a su régimen alimentario. Y así hay opiniones para distintas posibilidades: fitófagos generalistas, frugívoros, folífagos, ictiófagos, formífagos, ovífagos, malacófagos, consumidores de pequeños vertebrados terrestres, etc. El problema radica en que no existe un procedimiento adecuado para falsar estas hipótesis de manera fiable. Algunos han sugerido que los ornitomimosaurios serían formas omnívoras, lo que parece la propuesta más aceptable. Como demuestran las actuales tortugas y las aves, el pico es una estructura de gran versatilidad capaz de hacer viables diferentes tipos tróficos.

Parece, pues, atinado considerar a *Pelecanimimus* un corredor rápido de hábitos omnívoros. Una circunstancia singular podría poner en entredicho ese supuesto: el ornitomimosaurio de Las Hoyas, a diferencia de sus parientes más modernos, tiene dientes. Pero, bien mirado, este rasgo no altera la hipótesis de omnivorismo.

Hasta el descubrimiento de *Pelecanimimus* se creía que la aparición del pico en los ornitomimosaurios implicaba una reducción histórica en el número de dientes: a partir de antepasados dotados de un total de 60 a 80 dientes, el número de piezas dentarias decreció hasta acabar por desaparecer. Sin embargo, *Pelecanimimus* tiene más de 200 dientes, aunque difieren, en talla (minúsculos) y morfología (corona más baja y voluminosa), de los que mostraban sus antepasados. Estos datos, sumados a la hipótesis filogenética propuesta para *Pelecanimimus* (un ornitomimosaurio primitivo), permiten esbozar una historia evolutiva alternativa a la ortodoxa en lo referente a la aparición del pico en los ornitomimosaurios. La tendencia evolutiva de los ancestros no procedió en el sentido de la reducción del número de dientes, sino todo lo contrario, el incremento. La disposición estructural de numerosos dientes minúsculos produce una operación de corte, en tanto que los antepasados, con sus 60-80 dientes, degarraban los músculos y vísceras (práctica propia de animales cazadores-depredadores). En definitiva, los dientes de *Pelecanimimus* le permitían una actuación funcionalmente equivalente a la de sus descendientes dotados de pico (lo que en biología evolutiva se denomina "exaptación").

Los caracteres evidenciados por el ornitomimosaurio de Cuenca nos permiten conocer cómo se formó dicho pico. *Pelecanimimus* tiene, por detrás de cada uno de los últimos dientes superiores, una cresta ósea que constituye un pico incipiente. Este elemento craneal está constituido por un cerramiento en sentido oclusal de las paredes lingual y bucal de los maxilares. Así, la estructura encierra toda una batería de dientes (no funcionales) dentro de sus alvéolos. Es muy posible que ese rasgo aparezca todavía en las zonas maxilares del pico de los ornitomimosaurios más modernos (carácter que no se ha comproba-



Así sería Pelecanimimus polyodon. *La parte posterior del animal se ha reconstruido teniendo en cuenta la morfología presente en otros ornitomimosaurios*

do y que puede contrastar favorablemente nuestras hipótesis). Además, es previsible que la generación del pico en las áreas premaxilares y dentarias se haya desarrollado con el mismo procedimiento. La transformación de la batería dentaria en pico avanzó desde las zonas comisurales hacia las sínfisis premaxilares y dentarias, aunque no se pueden descartar objeciones a esta hipótesis (parece razonable la aparición independiente del pico en las zonas sinfisiarias).

El excelente estado de conservación de *Pelecanimimus* ha permitido la persistencia de elementos normalmente desconocidos entre los dinosaurios terópodos. Nos referimos al aparato hioideo, el esternón y diversas impresiones tegumentarias. El hioides es bastante simple (formado por dos ramas en "V"), con una longitud equivalente a un tercio de la longitud craneal, que en total mide unos 20 centímetros. Este desarrollo permite suponer la existencia de una lengua larga y activa. Destaca la presencia de una gran placa esternal. Un esternón tan desarrollado podría indicar la aparición de habilidades motoras del miembro anterior desconocidas en otros dinosaurios terópodos.

Pelecanimimus contiene diversas áreas singulares que se han atribuido a impresiones tegumentarias, bien visibles en determinadas zonas mediante luz ultravioleta. Se perciben con especial nitidez detrás del cráneo, alrededor del codo y por debajo del cráneo y cuello. En el primer caso parece tratarse de una cresta cefálica implicada, quizás, en procesos de selección sexual. Una interpretación semejante puede proponerse para los pliegues gular (bajo la cabeza) y subcervical. A comienzos de siglo se avanzó la posibilidad de que los ornitomimosaurios desarrollaran un pequeño patagio entre el brazo y el antebrazo. El esqueleto de *Pelecanimimus* parece confirmar de momento esta hipótesis, aunque podría tratarse de un artefacto tafonómico.

José Luis Sanz
Bernardino P. Pérez-Moreno
Universidad Autónoma de Madrid

Bancos de semillas

La extinción

Conservar semillas vivas a muy largo plazo, perdurables cientos o miles de años, se ha convertido en una tarea fácil y rutinaria, una vez conocidos los factores que condicionan el mantenimiento de la capacidad germinativa. Basta secar muy bien las semillas y almacenarlas a baja temperatura.

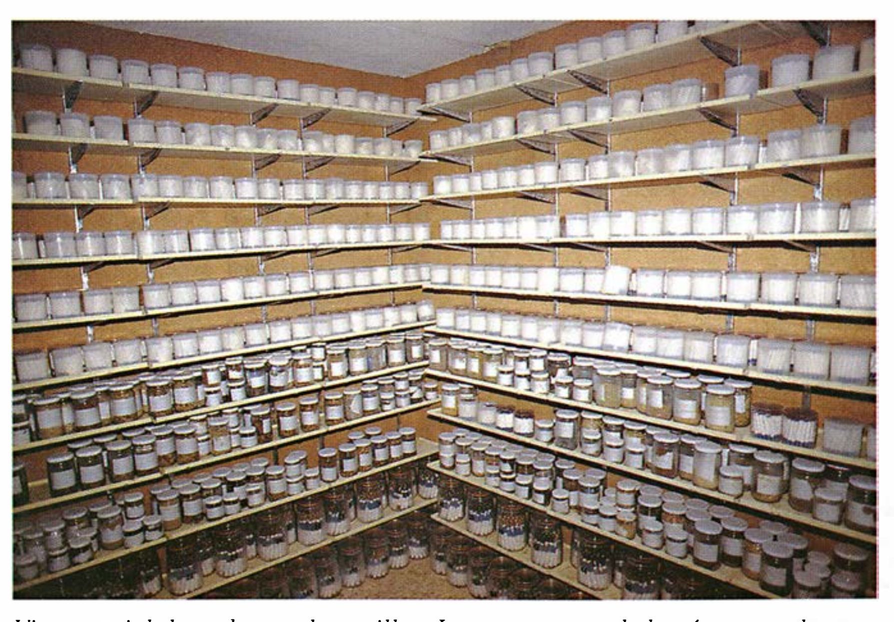
James F. Harrington estableció hacia 1960 las primeras reglas empíricas, fundadas en los resultados de las numerosas investigaciones que se habían venido realizando desde el siglo pasado. Postuló así que, por cada cinco grados que se rebaje la temperatura de almacenamiento, se duplicará la vida de la semilla; además, cada unidad porcentual que se rebaje en su contenido de humedad, tendrá el mismo efecto. Supongamos que una semilla guardada en el cajón de un armario a 20º C y con un 8 % de humedad, viviera, en condiciones normales, diez años. La misma semilla, desecada hasta un 4 % de humedad y en una cámara a –10º C ¡viviría más de diez mil años! La desecación ha supuesto prolongar su vida 2^4 veces, y el enfriamiento ha aportado un nuevo factor de 2^6. Los diez años iniciales deberemos multiplicarlos por 2^{10}.

Si bien no parece correcto extrapolar a miles de años los resultados de sólo siglo y medio de experimentación, hay suficientes indicios para admitir que las reglas de Harrington se cumplen, al menos de una forma muy aproximada. En numerosas ocasiones la arqueología ha recuperado, de estratos de antigüedad conocida, semillas almacenadas naturalmente en condiciones idóneas de frío y sequedad y han vuelto a germinar miles de años después. (No es cierta, sin embargo, la supuesta germinación de granos de trigo encontrados en las tumbas egipcias; las condiciones reinantes en el interior de una pirámide podrían alargar algo la vida del trigo, pero nunca milenios.)

Y aunque las reglas anteriores se cumplieran sólo en parte, a algunos siglos vista, no perdería fuerza un hecho irrefutable: contamos con un método sencillo, económico y eficaz para conservar una amplia diversidad de plantas, vivas, por mucho tiempo y en poco espacio. Un instrumento poderosísimo, en suma, para enviar material genético vegetal hacia el futuro, evitando así posibles extinciones, y mejorando todas las prestaciones de las colecciones clásicas de semillas.

Hace unos años, un pequeño jaramago (*Diplotaxis siettiana*) endémico de la isla de Alborán se extinguió al regarse con agua de mar los alrededores de una pista de aterrizaje donde crecía la planta. Por suerte, se había recolectado y almacenado semilla con anterioridad, a partir de la cual pudo recolonizarse la isla. Existiendo en España un número elevadísimo de plantas amenazadas de extinción, la utilidad de los bancos de semillas resulta evidente.

Se distinguen dos tipos de colecciones: las de base y las activas. Las colecciones base se dedican a especies cuyo material genético importa reservar para el mañana. Las colecciones activas distribuyen semillas entre los centros académicos y de



Vista parcial de un banco de semillas. La temperatura de la cámara suele estar entre –10 y –20 grados C. El contenido de humedad del material se mantiene entre 3 y 4 %, y no suele regularse en la cámara misma, sino dentro de cada envase individual. Así conservadas, las semillas pueden mantener su capacidad germinativa durante muchos siglos

investigación, sobre todo. Por lo común, cada muestra de semilla que se recolecta se reparte entre ambos fines, o se espera a una ulterior siembra y cosecha si la muestra de partida era escasa. Gracias a las colecciones base las plantas se salvan de la extinción; con las activas los botánicos realizan sus estudios de investigación fundamental (genética, bioquímica, sistemática) y los agrónomos sus aplicaciones prácticas (mejora vegetal).

Los bancos de semillas con fines agrícolas nacieron en los años sesenta. Se pretendía así conservar variedades locales de especies agrícolas que se perdían irreversiblemente ante el uso cada vez más generalizado de variedades internacionales mejoradas. La Comisión Internacional de Recursos Fitogenéticos (IBPGR, hoy Instituto: IPGRI) se encargó desde Roma de estimular la creación de una red mundial de bancos, organizando y financiando expediciones de recolección de razas locales de cereales, leguminosas, hortícolas, etcétera, por todo el mundo. Se ha perdido mucho material valioso, pero otra parte muy significativa se encuentra ya a buen recaudo en esa red de bancos. Se afirma que las variedades locales en desuso podrían desempeñar un papel importante como reserva de genes útiles en los programas de mejora.

En mi laboratorio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid, se inició en 1966 la aplicación de las mismas técnicas a especies silvestres con la elaboración de un banco de semillas de la familia crucíferas. Le siguió al poco otro proyecto sobre especies endémicas del Mediterráneo occidental. Hoy son ya varios los jardines botánicos que han transformado sus colecciones clásicas, reflejadas en el *index seminum* anual de ciertos centros, hacia bancos de semillas; se advierte, además, una tendencia hacia la creación de redes de bancos que compartan duplicados de cada muestra para salir así al paso del riesgo de pérdidas accidentales. En España funcionan ahora seis bancos dedicados a especies espontáneas endémicas o amenazadas; dentro del mundo mediterráneo, Portugal, Francia e Italia cuentan también con sendas instalaciones del mismo tipo.

Los bancos consagrados a plantas silvestres no poseen las proporciones de los dedicados a especies cultivadas, suelen estar vinculados a jardines botánicos o instituciones análogas y emplean sistemas de conservación altamente fiables. Controlan, en efecto, la humedad de cada muestra con un indicador y vigilan la hermeticidad de los envases. En pruebas recientes obtuvimos porcentajes de germinación más altos que hace veinticinco años (probablemente porque la dormición inicial cede durante el almacenamiento).

No admiten estos procedimientos en bancos las semillas de las especies llamadas "recalcitrantes". Otras plantas, como el banano, no se siembran por semilla; las hay también que, como los frutales, suelen reproducirse vegetativamente, porque en la plantación por semillas pierden sus cualidades. Para estos casos son útiles —aunque mucho más caras— las colecciones vivas; y se puede recurrir a otros métodos: cultivo de tejidos e inmersión en nitrógeno líquido. Todos estos son procedimientos "ex situ".

Para las plantas silvestres es fundamental la conservación "in situ", esto es, en la naturaleza misma, en forma de espacios protegidos, parques, reservas, etcétera, junto con sus otros acompañantes vegetales o animales. De todos modos, la conservación "in situ" no se contrapone a la "ex situ"; antes bien, se complementan, y lo recomendable es usar ambos métodos simultáneamente.

La pérdida de biodiversidad no sólo afecta a los seres vivos que nos han precedido, sino también a la diversidad (plantas y animales domésticos) creada por el hombre desde el Neolítico.

CÉSAR GÓMEZ CAMPO
Universidad Politécnica de Madrid

Arqueozoología

Gineta

El origen e historia evolutiva de la mayoría de los mamíferos europeos están bien documentados en la actualidad gracias a la información que nos proporciona el registro fósil. Una de las pocas excepciones es la gineta (*Genetta genetta*). Este carnívoro, junto con el meloncillo (*Herpestes ichneumon*), pertenece a una familia arcaica, la de los vivérridos, que muestran hoy una marcada distribución tropical y cuya última aparición en el subcontinente europeo data del Villafranquiense inferior, a comienzos del Pleistoceno.

La ausencia de ginetas y meloncillos en el registro fósil europeo resulta tan patente, que muchos investigadores, entre ellos M. Delibes, de la Estación Biológica de Doñana, abrazan sin reservas la hipótesis de que la colonización subcontinental por parte de ambas especies se debió al hombre; otros defienden hipótesis alternativas, ya sea previas a la definitiva ruptura del puente de Gibraltar, ya sea posteriores a las glaciaciones pleistocénicas.

En el caso particular de la gineta un segundo problema viene a sumarse al biogeográfico. Nos referimos al proceso de domesticación que presumiblemente experimentó el vivérrido en el pasado. Sobre este asunto, y a falta de información rigurosa, las posturas divergen. Sabemos que las ginetas, como muchos otros pequeños carnívoros, son mantenidas en régimen de cautiverio o semidomesticidad por los bereberes y otros pueblos africanos. Su función principal suele ser la de servir de mascotas, aunque, secundariamente, se les permita cazar pequeños animales que, como ciertos roedores, prosperan cerca de los asentamientos humanos.

Ese tipo de relación hombre-animal no ha desembocado en un proceso de radiación del tipo que opera en animales domésticos sometidos a un estricto control genético (esto es, reproductor). Por otra parte, los hallazgos de ginetas en yacimientos prehistóricos africanos se han venido atribuyendo a la actividad cinegética. Sorprende, por tanto, que ciertos autores, así J. Kingdom, mantengan que, hasta bien entrada la Edad Media, las ginetas no fueron suplantadas por los gatos como destructoras de plagas; y sorprende todavía más que, en una publicación oficial del Consejo de Europa, C. J. Smit y A. Van Wijngaarden defiendan que las ginetas se siguen domesticando en el sur de Europa.

En cualquier caso, la pregunta que queda pendiente es si la actual población europea de ginetas desciende de formas silvestres o si, por el contrario, se trata de animales domésticos que escaparon del control humano y establecieron poblaciones cimarronas a posteriori.

Dentro de este panorama biocultural cobran interés los recientes hallazgos en niveles almohades (primer cuarto del siglo XIII) de la ciudad de Mértola en el Bajo Alentejo portugués, donde se ha recuperado un fragmento de hemipelvis izquierda de una gineta adulta, extraída de un depósito sellado (*figura 1*). Este hueso constituye la única prueba de que disponemos para demostrar la existencia del vivérrido en épocas pretéritas en la península Ibérica y, por ende, en Europa.

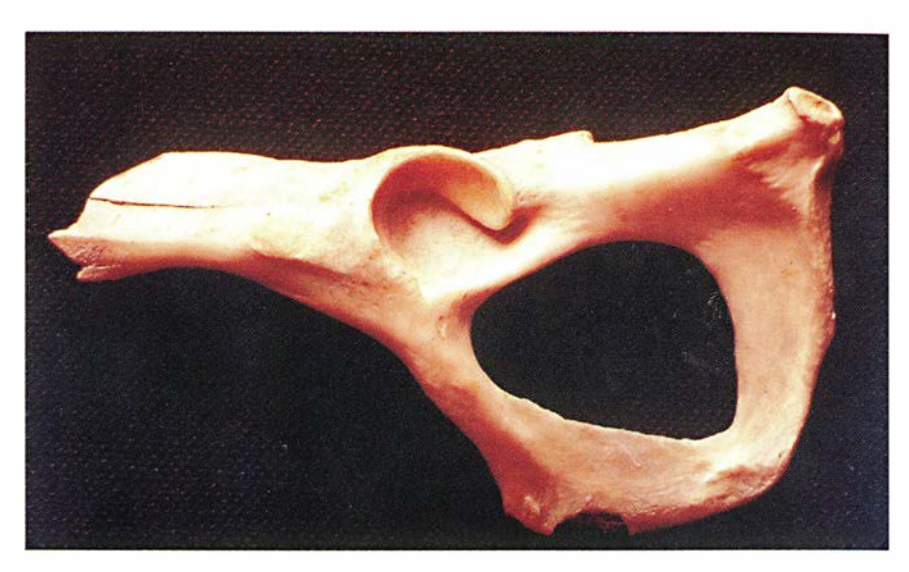
El segundo de los hallazgos en ese mismo nivel, una tibia de liebre, reviste una importancia similar. Sobre este hueso se aprecian tenues cortes a mitad de la diáfisis que parecen

resultado de un proceso de descarnamiento, consecuencia del consumo por parte del hombre (*figura 3*), así como una serie de perforaciones en la zona correspondiente a la epífisis proximal, producidas por las cúspides dentarias de un carnívoro (*figura 2*). Las distancias entre lo que parecen ser las improntas del metacono, protocono y paracono coinciden con las del primer molar superior (M^1) de una gineta y excluyen a cualquier otro carnívoro de talla similar al vivérrido. Ello nos ha permitido atestiguar un uso secuenciado de la tibia y, a partir del mismo, inferir que la gineta no sólo existió en Mértola, sino que, además, se alimentó con restos animales previamente utilizados por los hombres.

De aquí a postular que la gineta de Mértola estaba domesticada media, sin embargo, un abismo. No obstante, tenemos datos para pensar que no nos encontramos ante un animal silvestre en el sentido estricto del término. Para empezar, la aparición de la especie en un contexto urbano complejo no parece consecuente con sus hábitos, independientemente de que la gineta no exhiba una antropofobia tan tajante como otros carnívoros europeos. Por otro lado, a pesar de su ecléctico régimen alimentario, la mayoría de las presas consumidas por la gineta proceden de la caza, y la carroña constituye un elemento marginal en su dieta. Por último, la fosa donde apareció la pelvis incluía abundantes restos de rata negra (*Rattus rattus*).

Obviamente toda esta gavilla de pruebas, indirectas y contextuales, resulta muy débil a la hora de defender la existencia de un proceso de domesticación. Sin embargo, el que sean almohades (bereberes que aún hoy en día mantienen ginetas en cautividad) los niveles arqueológicos que proporcionen los primeros restos de esta especie en Europa y el que exista información complementaria en apoyo de una existencia y manutención atípica para el vivérrido en Mértola nos inducen a pensar que las actuales ginetas europeas tienen su origen, no sólo en un stock de animales importados, sino también mantenidos de modo artificial. Queda por ver si, a través de análisis moleculares, es posible fechar con mayor precisión el momento de la primera colonización e, incluso, confirmar la existencia de una posible base genética indicadora del putativo proceso de domesticación.

ARTURO MORALES MUÑIZ
Universidad Autónoma de Madrid



Fragmento de pelvis izquierda de gineta recuperada en el yacimiento almohade de Mértola (Bajo Alentejo, Portugal). Foto: J. Trueba



Detalle de la porción proximal de una tibia de liebre recuperada en el mismo contexto que la pelvis de gineta; se aprecian las improntas de las principales cúspides dentarias de la carnicera superior del vivérrido. Foto: J. Trueba



Detalle de la diáfisis de la tibia de liebre representada en la figura 2. Se distinguen las señales de cortes de indudable origen antrópico. Foto: J. Trueba

De cerca

Fotos y texto: Kōji Nakamura

Nacido de sirena

Comenzó en enero. Me había sumergido hasta una profundidad de 45 metros a un tiro de piedra de la costa. Sobre un firme celentéreo una hembra de escualo había depositado un huevo, que descansaba sólidamente adherido. El propio hecho constituía ya una rareza. Los tiburones suelen nacer vivos, o, por decirlo con el tecnicismo al uso, son ovovivíparos. Aunque existen varios órdenes y dos centenares largos de especies, la gente no va más allá, por lo común, de reconocer el morro extendido hacia delante, la boca amenazadora con dientes triangulares, los ojos vivos y las aletas en punta de estos protagonistas habituales de las películas de terror.

No se compaginaba bien la fuerza y fiereza que caracterizan a esos peces cartilaginosos con la soledad y casi desamparo en que parecía quedar el embrión. Mes tras mes, siempre en los primeros días, volvía para contemplar el desarrollo de aquella creatura, sin que advirtiera la presencia cercana de la madre que, es de suponer, andaba atenta para que ningún depredador truncase su evolución. Así, hasta el diciembre del mismo año. Transcurridos exactamente 320 días, rompió su membrana protectora un precioso, al par que seguro, alevín. Diríase que estaba en su reino.

FOTO INFERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 8
exposición: 1 segundo
película: ISO = 25

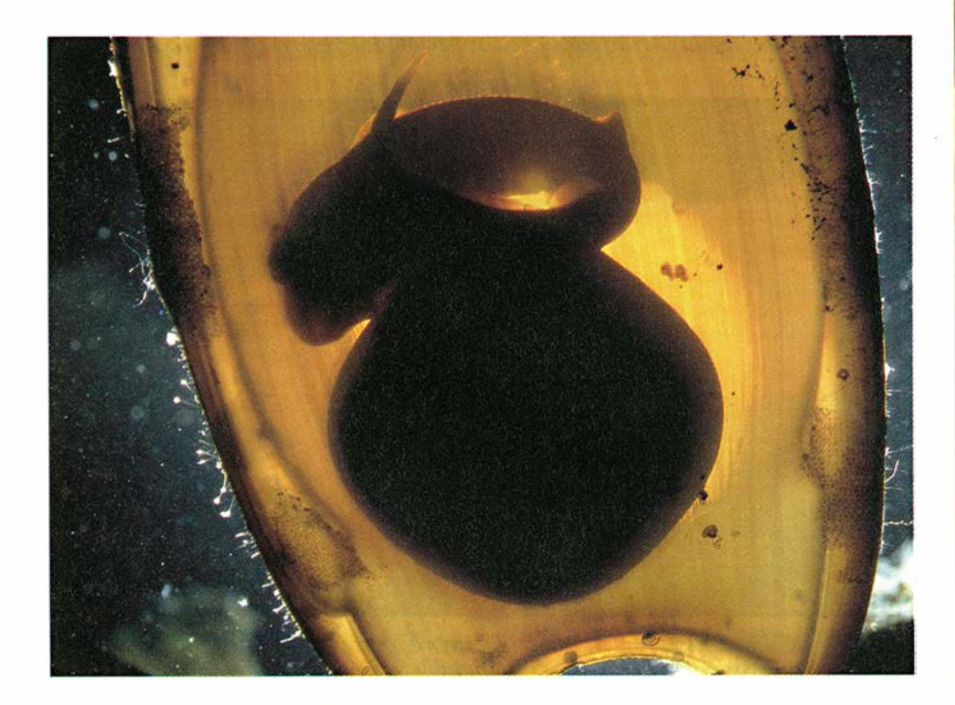




FOTO SUPERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 16
exposición: 1 segundo
película: ISO = 25

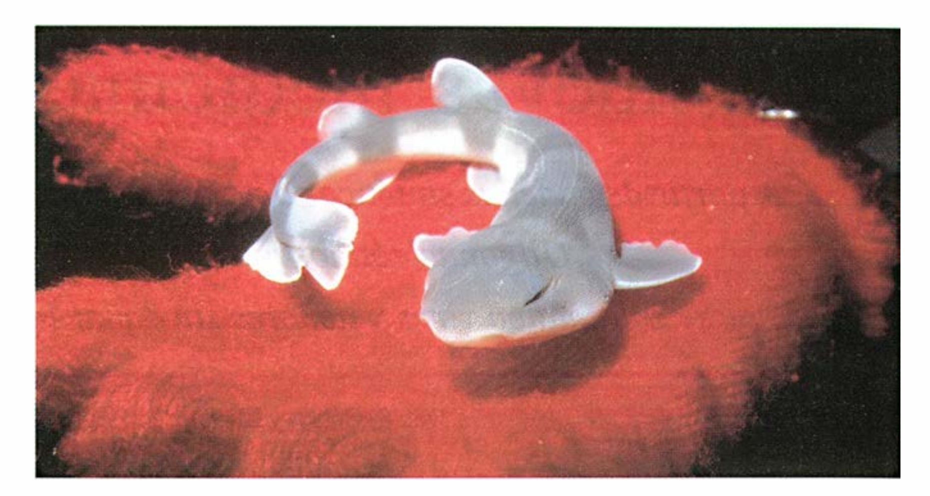


FOTO INFERIOR
distancia focal: 55 mm
diafragma: F = 11
exposición: 1 segundo
película: ISO = 25

Las nuevas medicinas genéticas

A partir de cadenas sintéticas de ADN se fabrican nuevas drogas. Oligonucleótidos antisentido y tríplices se enfrentan a virus y tumores sin dañar los tejidos sanos

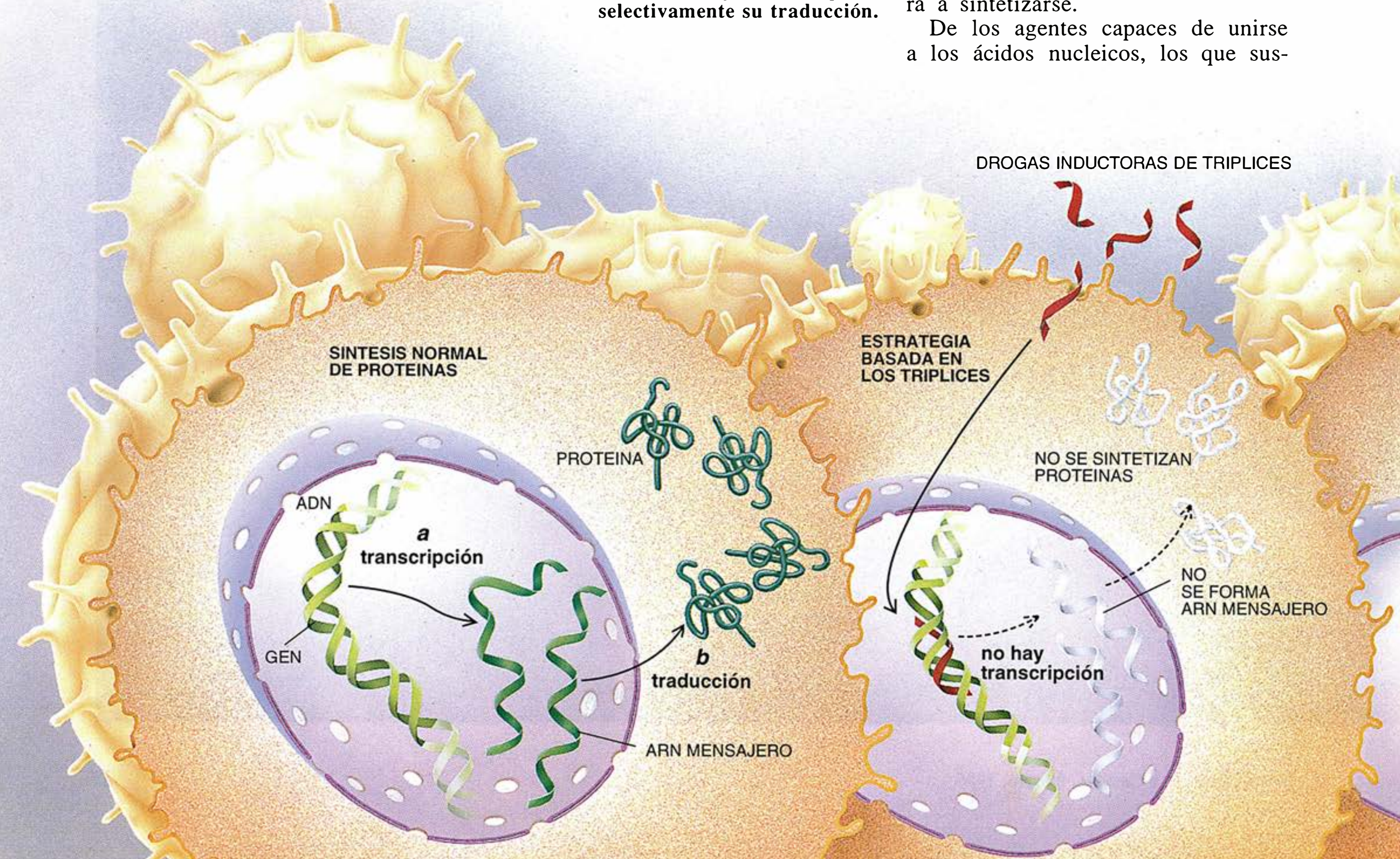
Jack S. Cohen y Michael E. Hogan

A cualquiera que esté interesado en sanar una enfermedad nada le puede resultar más gratificante que descubrir un "proyectil mágico", una droga capaz de acabar con la patología sin producir efectos no deseados. Durante la mayor parte de este siglo, los investigadores que buscaban esos proyectiles mágicos pensaban en agentes que se uniesen a los sitios activos de las proteínas responsables de las enfermedades. Al rellenar esos sitios activos, que difieren de unas proteínas a otras, los fármacos deberían inhibir específicamente la actividad de las proteínas en cuestión, sin obstaculizar la función de las demás.

Se esta trabajando ya en ese campo. Recientemente, sin embargo, algunos investigadores han centrado su atención en unas dianas distintas. Con estrategias basadas en antisentidos y tríplices, se aprestan a diseñar drogas que se unan a sitios escogidos de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) que dirigen la síntesis de las proteínas relacionadas con la enfermedad.

La lógica del proyecto es sencilla. Para que se fabrique una proteína, debe expresarse el gen que cifra su composición. Esto es, debe transcribirse, o copiarse, de una molécula de ADN bicatenaria en moléculas individuales de ARN mensajero unicatenarias. Luego, esas moléculas de ARN se traducen en la correspondiente proteína. Los investigadores esperan que las nuevas drogas se unan a segmentos elegidos del ADN (si se utiliza la estrategia de los tríplices) o del ARN mensajero (si es la de los antisentido) e impidan la transcripción o la traducción de los genes seleccionados, sean genes microbianos o formas aberrantes de variedades humanas. Este tipo de compuestos, por tanto, no se limitan a desarmar las proteínas deletéreas, sino que impiden que lleguen siquiera a sintetizarse.

De los agentes capaces de unirse a los ácidos nucleicos, los que sus-

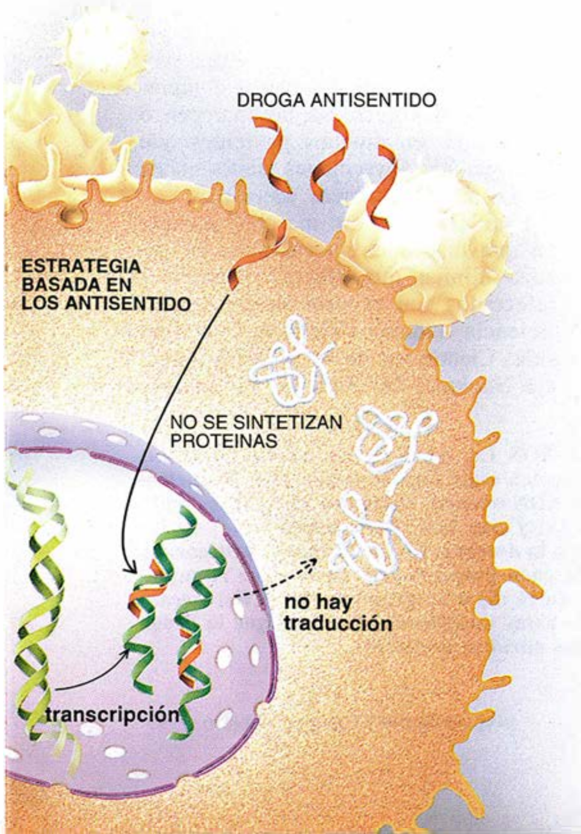


1. SE ENCUENTRAN EN FASE DE ENSAYO dos estrategias innovadoras encaminadas a impedir la síntesis de proteínas relacionadas con enfermedades. En la síntesis de una proteína (*izquierda*) se requiere que el gen que cifra su composición se transcriba (*a*) en moléculas de ARN mensajero. Luego, el ARN debe traducirse (*b*) en copias de la proteína. La estrategia basada en los tríplices (*centro*) se propone detener la producción de proteínas no deseadas. Para ello inhibe la transcripción del gen correspondiente. En la estrategia antisentido (*derecha*), el objetivo es impedir selectivamente su traducción.

citan una atención mayor son los oligonucleótidos de ADN, conocidos también por oligómeros: breves trechos de nucleótidos, que son las unidades que constituyen el ADN. En parte, la elección de oligómeros se debe a que los ácidos nucleicos se unen entre sí de acuerdo con unas reglas perfectamente acotadas. En consecuencia, pueden diseñarse compuestos que reconozcan un sitio único en un gen elegido o en su transcrito de ARN mensajero. Potencialmente, por tanto, tienen la especificidad que se busca en un proyectil mágico.

Para que las terapias basadas en los antisentido o en los tríplices lleguen a tener un uso rutinario hay que salvar aún algunos obstáculos. Con todo, tenemos buenas razones para el entusiasmo. De hecho, la eficacia de algunas drogas oligonucleotídicas ha justificado ya su utilización en ensayos clínicos. Se están experimentando en pacientes con leucemia, sida y otras enfermedades necesitadas de tratamientos más eficaces.

Como las drogas oligonucleotídicas son, en esencia, retazos de material genético, suelen a menudo tener la consideración de terapias genéticas. Debemos aclarar, sin embargo, que ese tipo de tratamientos difiere sustancialmente de las terapias genéticas tradicionales. En la mayoría de los tratamientos genéticos, se suministran genes enteros y sanos para sustituir las versiones que faltan o que son defectuosas e incapaces de dirigir la síntesis de una proteína necesaria. Los oligonucleótidos no pueden producir proteínas. Su virtud radica en la capacidad para bloquear la expresión de genes existentes.



El nombre de tríplice, aplicado a una estrategia bloqueadora de la transcripción, proviene de la configuración siguiente: los oligonucleótidos que se emplean para detener la transcripción se "abrazan" a la doble hélice formando una hélice triple. En la estrategia "antisentido", cuyo objetivo es impedir la traducción, la lógica del nombre es menos evidente. Pero se puede comprender fácilmente si se conoce un poco sobre la estructura del ARN y el modo en que una molécula de ARN se combina con otra o con el ADN.

Las moléculas de ARN son tiras de nucleótidos. Los nucleótidos contienen un azúcar ribosa, un grupo fosfato (PO_4) y una de las cuatro bases nitrogenadas: adenina (*A*), guanina (*G*), citosina (*C*) y uracilo (*U*). (Los nucleótidos de ADN son similares con dos salvedades, a saber, el azúcar es desoxirribosa y tiene la base timina, *T*, en lugar de uracilo.) Cuando se forma un segmento de nucleótidos de ARN o ADN, los azúcares y fosfatos constituyen la columna vertebral de la cadena resultante; las bases sobresalen de esa columna vertebral. Como James D. Watson y Francis Crick demostraron para el ADN en 1953, dos ácidos nucleicos pueden combinarse en una estructura de doble cadena gracias a los enlaces de hidrógeno que se establecen entre sus bases. Adenina, en una cadena, se combina con timina o uracilo en la otra cadena; guanina se combina con citosina. Por tanto, si una cadena de ARN contiene la secuencia *AUCCGUG*, se puede emparejar con otro tramo de nucleótidos que tenga la secuencia complementaria, *UAGGCAC* en el caso de ARN, o *TAGGCAC* en el caso de ADN.

La secuencia de bases a lo largo de una molécula de ARN mensajero cifra la secuencia de aminoácidos que debe ensamblarse para formar una proteína (en otras palabras, porta la información que necesita una célula). Se dice de esa secuencia de ARNm que tiene sentido. Para producir una molécula capaz de unirse a la cadena dotada de sentido, hay que construir su complementaria, o cadena "antisentido". Por ello, se denomina estrategia antisentido a la práctica de inhibir con oligonucleótidos la traducción.

Los oligonucleótidos antisentido son la primera de las nuevas medicinas genéticas que han llegado a la etapa de ensayo clínico. De su potencialidad terapéutica se sospechó ya a principios de los ochenta, cuando se descubrió que ciertos microbios, además de fabricar ARN mensajero, también producían de forma natural ARN antisentido. La explicación más lógica para ese comportamiento parecía ser que el organismo utilizaba las moléculas antisentido como forma (desconocida hasta entonces) de regular la expresión génica. Si el ARN antisentido se empareja con su molécula complementaria de ARN mensajero, cabe pensar que bloqueará la maquinaria celular encargada de traducir en proteína la cadena con sentido.

Igual que los microbios, las células vegetales y animales emplean a veces la estrategia antisentido para controlar la expresión génica. Pero, volviendo atrás en el tiempo, los investigadores trataban de comprobar si su hipótesis era correcta. Con la ayuda de las técnicas de ADN recombinante, crearon genes que producían versiones antisentido de ciertos ARN mensajeros seleccionados. Cuando se introducían esos genes en las células se comprobaba que, en efecto, ocasionalmente se conseguía disminuir la producción de la proteína cifrada por la cadena de ARN que era blanco del antisentido.

Los resultados sugerían la posibilidad de diseñar moléculas antisentido que funcionasen a la manera de drogas e impidiesen selectivamente la traducción. Sin embargo, para utilizarlas como tales drogas, había que enviarlas al interior de las células del cuerpo, y hacerlo de una forma fácil y eficaz. En la mayoría de los casos, lo mejor sería administrar pequeños fragmentos de antisentido sintéticos, en vez de genes enteros. Algunos investigadores, no obstante, siguen trabajando con genes antisentido.

A mediados de los ochenta, ya se disponía de herramientas adecuadas para sintetizar oligonucleótidos de ADN. Pero quedaba por ver si tales oligómeros podrían servir de fármacos. Algunos años antes, en 1978, Paul C. Zamecnik, de la Fundación Worcester, y Mary L. Stephenson, de Harvard, habían conseguido construir

JACK S. COHEN y MICHAEL E. HOGAN investigan en cadenas antisentido y tríplices, respectivamente. Cohen enseña farmacología y bioquímica en el hospital clínico de la Universidad de Georgetown. En 1990 colaboró en la constitución de PharmaGenics, Inc., de la que fue asesor hasta 1993. Hogan, profesor en el centro de biotecnología y en el departamento de biología celular de la Facultad de Medicina de Baylor, es consejero de las empresas Triplex Pharmaceutical Corporation y Genometrix, Inc.

con sumo esfuerzo un oligómero de 13 nucleótidos, diseñado para reconocer una secuencia de bases presente en muchas moléculas de ARN mensajeros fabricados por el virus del sarcoma de Rous. Ese oligómero reducía la replicación del virus en las células, señal de que había bloqueado la producción de proteínas necesarias para elaborar nuevas partículas víricas. Dos problemas potenciales, sin embargo, preocupaban a los investigadores.

En primer lugar, los oligonucleótidos sin modificar portan una carga negativa en cada grupo fosfato. Las moléculas dotadas de carga suelen tener dificultades para atravesar las membranas celulares, que no están cargadas. Por tanto, la mayoría de los investigadores daban por supuesto que los oligómeros con muchas cargas serían incapaces de entrar eficazmente en las células. En segundo lugar, las células poseen numerosas enzimas que degradan el ADN foráneo. Para la mayoría de los casos, cabía pensar en una pronta degradación de los oligómeros que consiguiesen entrar en las células.

Con el fin de resolver estos inconvenientes, Paul O. P. Ts'o y Paul S. Miller, de la Universidad Johns Hopkins, modificaron los oligonucleótidos habituales. Para ello, reemplazaron un átomo de oxígeno de cada grupo fosfato por un grupo metilo (CH_3). Convertían así los fosfatos cargados negativamente en unidades sin carga: los metilfosfonatos. De esa manera los oligonucleótidos entraban mejor en las células y resistían el ataque enzimático. Mas, al eliminar las cargas, los oligómeros se volvían hidrofóbicos (repelían el agua) y se hacían insolubles en soluciones acuosas. La falta de solubilidad puede dificultar la producción en masa.

Kazuo Shinozuka y Gerald Zon, de la norteamericana Oficina de Alimentación y Farmacología, en colaboración con uno de los autores (Cohen), idearon una alternativa a los oligonucleótidos metilfosfonatados. Intercambiaron un átomo de oxígeno de los grupos fosfatos normales por un átomo de azufre cargado negativamente. Esos oligómeros fosfotiolados, conocidos por "oligos S", son solubles en agua, fáciles de producir automáticamente y resistentes a la degradación enzimática. Quizá por esas razones, en la mayoría de las investigaciones con drogas antisentido se emplean ahora oligómeros S.

Sabemos que las células toman oligos S y oligonucleótidos sin modificar con mayor facilidad de lo que en un principio se pensaba. Según parece, los agentes dotados de carga entran en las células, no sólo por difusión directa a través de la membrana celular, sino también por endocitosis. En este segundo proceso, la membrana celular engloba a los compuestos formando una pequeña vesícula, que luego se deposita en el citoplasma. Lo que no está muy claro es si el contenido de tales endosomas se libera fácilmente.

Además de eliminar algunas de las barreras iniciales que tenía el uso terapéutico de los oligonucleótidos antisentido, las investigaciones realizadas en los últimos 15 años han puesto de manifiesto otros factores importantes que deben tomarse en consideración a la hora de diseñar drogas antisentido. Por ejemplo, los oligómeros deben constar de un mínimo de 15 nucleótidos para que se unan eficazmente a sus dianas y no lo hagan en sitios inespecíficos. Se ha averiguado también que los oligonucleótidos antisentido pueden bloquear la traducción al menos de dos maneras. De acuerdo con lo previsto, obstaculizan la "lectura" normal del ARN con sentido. Y, además, al unirse al ARN mensajero estimulan a una enzima (ribonucleasa H) que corta, y por tanto destruye, al ARN mensajero que participa en la unión.

Estos descubrimientos permitían albergar esperanzas en las posibilidades terapéuticas de la estrategia antisentido. Quedaba, sin embargo, por saber si el ADN antisentido podía realmente retrasar la producción de proteínas implicadas en enfermedades. Experimentos realizados con células cultivadas y datos provisionales de ensayos en humanos así lo sugieren. (Los ensayos clínicos emplean oligos S.) Trabajos anteriores, realizados con animales en diversos laboratorios, indicaban también la escasa o nula toxicidad de los agentes antisentido. Se trata de una buena noticia, pues en las células cultivadas los oligos S acostumbran unirse a proteínas o a otras dianas no deseadas. A veces, esas interacciones inespecíficas contribuyen a reforzar el bloqueo directo de la traducción. Pero existe siempre el temor de las secuelas inesperadas.

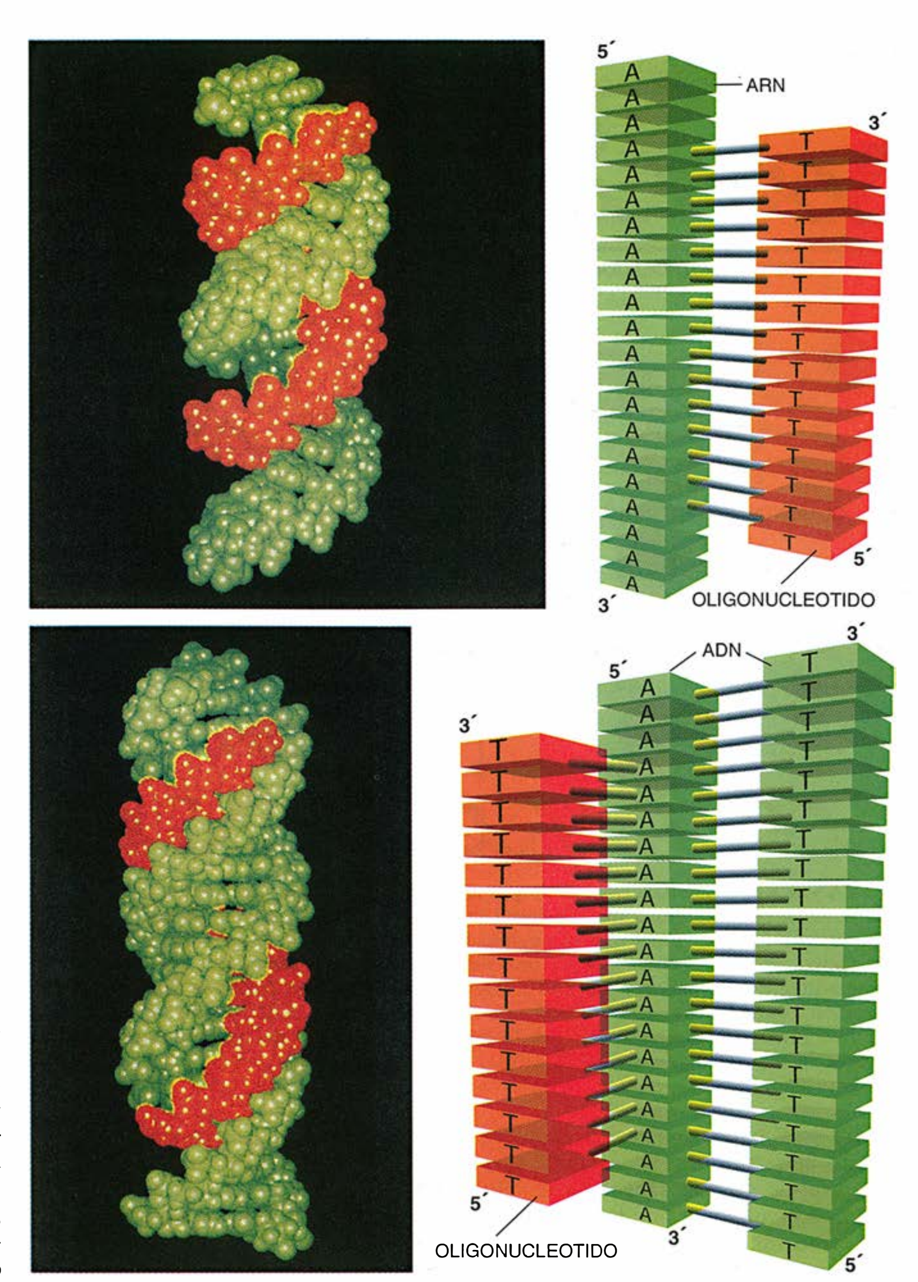
Los primeros oligómeros antisentido que salgan al mercado serán probablemente los diseñados para combatir infecciones víricas. La compañía farmacéutica ISIS, de Carlsbad, está realizando un ensayo clínico a gran escala con un oligonucleótido dirigido contra transcritos de un gen vírico importante para la replicación del papilomavirus humano. Este virus produce verrugas genitales. Se ha comprobado que las verrugas desaparecen o se achican en muchos pacientes que han recibido inyecciones directamente en las zonas cutáneas afectadas.

Está también en marcha, aunque en una fase más embrionaria, un ensayo clínico que afecta a pacientes infectados con el virus de inmunodeficiencia humana (VIH), la causa del sida. Científicos de la francesa Agencia Nacional del Sida, de la empresa

2. LOS NUCLEOTIDOS SON LA BASE de las nuevas medicinas genéticas. Estas drogas suelen estar formadas por 15 o 20 nucleótidos, similares a los del ADN normal: contienen un azúcar (*azul*), un grupo fosfato (*marrón*) y una base nitrogenada (*rojo*) de las que se enumeran arriba a la derecha. En los fármacos antisentido, un átomo de oxígeno de cada grupo fosfato suele estar reemplazado por un átomo de azufre (S) o un grupo metilo (CH_3) (*recuadro, abajo a la derecha*). Estas modificaciones hacen que la droga no sea degradada por las enzimas celulares.

Hybridon en Worcester y otros evalúan la eficacia de un oligómero dirigido contra el ARN del gen gag del VIH, que es necesario para la replicación del virus.

Se han iniciado también ensayos clínicos con oligómeros dirigidos contra el cáncer. Uno de esos ensayos se está realizando con pacientes afectados de leucemia mielógena aguda, un cáncer de la sangre de rápida progresión. En el experimento, un grupo del hospital clínico de la Universidad de Nebraska colabora con científicos de Lynx Therapeutics, de Hayward. Se proponen comprobar, a través de un procedimiento designado como purga "ex vivo" de médula ósea, si un oligonucleótido antisentido es capaz de destruir células cancerosas dentro del cuerpo. En este procedimiento, los cirujanos extraen médula ósea de un paciente y la tratan con un agente que destruye selectivamente las células cancerosas. A continuación, administran quimioterapia al sujeto y le vuelven a introducir las células "limpiadas". En este estudio, el oligómero se dirige contra el ARN del gen *p53*. El gen, considerado un supresor de tumores, parece que se sobreexpresa en los pacientes con leucemia mielógena aguda.

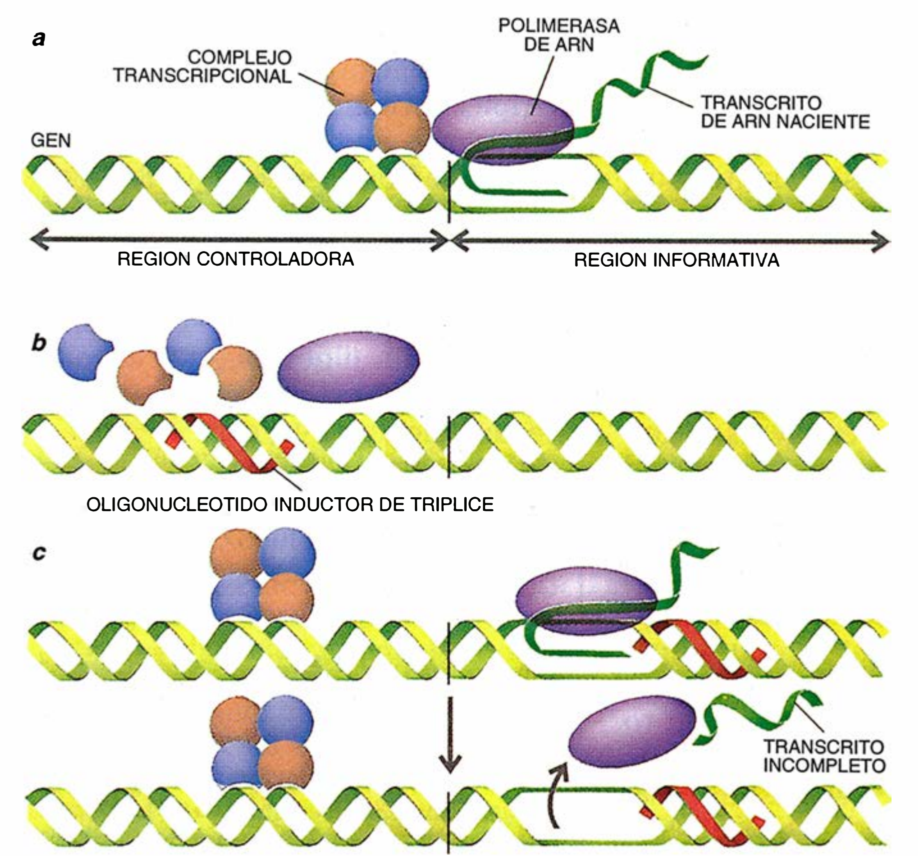


3. LOS OLIGONUCLEOTIDOS (*rojo*) se unen a sus dianas de ácidos nucleicos (*verde*) en la forma indicada en los modelos espaciales (*izquierda*). Arriba, un oligonucleótido antisentido se abraza a una cadena de ARN mensajero, creando una hélice doble. El otro oligonucleótido se enrolla sobre el surco mayor de una doble hélice de ADN, produciendo una hélice triple (*abajo*). A la derecha de los respectivos modelos se indican los oligonucleótidos (identificados por la primera letra de sus bases) que participan en esas uniones.

Lynx colabora también con Alan M. Gewirtz, de la Universidad de Pennsylvania, en el desarrollo de una droga antisentido contra la leucemia mielógena crónica. Su ensayo, que de nuevo valora la capacidad de un fármaco antisentido para eliminar células cancerosas durante una purga de médula ósea *ex vivo*, está dirigido contra el ARN mensajero del gen *c-myb*. En su estado "sano", *c-myb* promueve la proliferación normal de las células sanguíneas. Una regulación anormal del gen parece la causa de ciertas leucemias humanas y otras enfermedades. Gewirtz ha abordado otros ensayos para valorar la eficacia de la introducción directa del agente antisentido en los pacientes leucémicos.

En fase de proyecto, o incluso de desarrollo, hay asimismo ensayos clínicos contra otros virus y genes relacionados con el cáncer. Aun cuando los resultados sean positivos, los agentes antisentido se administrarán con otras drogas anticancerígenas o antivíricas. Dos o más compuestos que operan con mecanismos diferentes deben ser más eficaces que uno solo.

Como cabía esperar de toda nueva técnica, serán muchas las dificultades que habrá que superar antes de que la estrategia antisentido se consolide. Por una parte, los oligonucleótidos son muy caros (aunque cada vez menos). La estabilidad de los compuestos debe mejorarse. Y habrá que elaborar métodos más idóneos para introducirlos en las células en las cantidades adecuadas. Las investigaciones con los tríplices, que analizaremos a continuación, plantean problemas similares. También es necesario aumentar la potencia. Para ello, algunos investigadores están adosando a las moléculas ciertos agentes con capacidad para degradar ARN. Otros, como Claude Hélène y sus colegas, del Museo de Historia Natural de París, han fabricado oligómeros que portan grupos químicos capaces de insertarse entre las bases del dúplice ADN-ARN; con ello se consigue estabilizar la unión y prolongar la actividad antisentido. El grupo de Cohen y otros utilizan modelos moleculares para diseñar oligonucleótidos con nuevas estructuras espaciales, al objeto de mejorar su potencia y especificidad.



4. TRANSCRIPCION DE UN GEN, que se produce (*a*) cuando el grupo de proteínas que forman el complejo transcripcional se une a la región controladora del gen. Ese complejo es la señal para que la enzima polimerasa de ARN (*púrpura*) copie la información que contiene el gen en una molécula de ARN mensajero (*verde oscuro*). La mayoría de los agentes diseñados para formar tríplices (*rojo*) se dirigen contra la región controladora. Ello impide que la polimerasa de ARN pueda unirse al gen (*b*). Los fármacos diseñados contra la región informativa del gen también pueden detener la transcripción en marcha (*c*).

Mientras tanto, existe un planteamiento antisentido muy diferente que progresa de forma espectacular. No se emplean oligonucleótidos de ADN, sino ribozimas. Estas moléculas de ARN reconocen secuencias de bases específicas en el ARN mensajero y cortan al ARN por esos sitios, destruyendo los transcritos. En los próximos meses, Flossie Wong-Staal, de la Universidad de California, espera iniciar un ensayo clínico con una ribozima dirigida contra el transcrito de ARN de un gen del VIH.

Aunque la atención prestada a la otra nueva estrategia genética, basada en los tríplices, sea más reciente, los indicios sobre sus posibilidades se remontan a los años cincuenta. Cuatro años después de que Watson y Crick descubrieran la estructura en doble hélice del ADN, Gary Felsenfeld y Alexander Rich, a la sazón becarios posdoctorales del Instituto Nacional de la Salud, estudiaban las estructuras pluricatenarias formadas por los ácidos nucleicos. Sintetizaron polímeros de ARN de nucleótidos con uracilo y los mezclaron con cadenas complementarias, esto es, polímeros sintéticos con nucleótidos de adenina. De acuerdo con lo esperado, consiguieron dobles hélices de *AU*. Mas, para su sorpresa, también obtuvieron tríplices UAU, en los que una cadena adicional de nucleótidos de uracilo se había unido a la doble hélice de *AU*.

Más tarde, Michael J. Chamberlin y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron que los polímeros de ADN correspondientes, formados exclusivamente de nucleótidos de timina o de adenina, podían ensamblarse en tríplices *TAT*. Richard A. Morgan y Robert D. Wells, a la sazón en la Universidad de Wisconsin, obtuvieron otro tipo de tríplices de ADN. Demostraron que una cadena de nucleótidos de citosina se unía a una doble hélice *GC*. En este caso, la triple hélice sólo se producía cuando las moléculas se hallaban en una solución ligeramente acídica, con abundancia de protones. La acidez era necesaria porque la triple hélice sólo se formaba si la cadena de citosinas extra adquiría un protón adicional. La estructura resultante responde al nombre de tríplice C^+GC.

Pasaron unos diez años en que los tríplices permanecieron en el reino de las curiosidades. A nadie se le ocurrió imaginarse que pudieran servir para regular genes nativos en las células. Además, los genes de los organismos vivos no contienen "homopolímeros" simples, en los que un solo nucleótido se repite de forma monótona. Para que fueran útiles, los oligonucleótidos instauradores de tríplices deberían reconocer genes cuyas cadenas estuvieran constituidas por más de un tipo de pareja de bases.

A finales de los años sesenta Morgan y Wells consiguieron tríplices que contenían unidades *TAT* y C^+GC. Para ello, combinaron un oligómero que portaba timinas y citosinas con una doble hélice que presentaba pares de bases *AT* y *GC*. Era el primer indicio serio de que se podrían lograr tríplices en los genes naturales, no sólo en las dobles hélices sintéticas. Pero no se contaba todavía con las herramientas necesarias para llevar a cabo tales experimentos. No se habían inventado todavía las técnicas automáticas para clonar genes y sintetizar oligonucleótidos de ADN.

En las postrimerías de los años ochenta, esos problemas pertenecían al pasado. Por entonces, los investigadores conocían bastante bien la regulación de la transcripción de los genes. Se descubrió que los genes contienen básicamente dos elementos: uno es la región reguladora, que controla la tasa de transcripción, y el otro es la región que cifra la secuencia de aminoácidos de la correspondiente proteína. Los genes se transcriben cuando los factores de transcripción (que son proteínas) se unen a sitios específicos de la región de control. Producida la unión, una enzima, la polimerasa de ARN, copia la información de la región que cifra la información, y produce el ARN mensajero. Los segmentos que cifran la información suelen ser más inaccesibles a los fármacos que algunas partes de las regiones reguladoras.

Los investigadores debían, pues, concentrar sus esfuerzos en el diseño de oligonucleótidos capaces de unirse a la región de control del gen diana, para impedir que los factores de transcripción iniciasen la transcripción. Antes de ello, los científicos necesitaban asegurarse de que los oligonucleótidos sintéticos estaban realmente capacitados para reconocer determinadas secuencias de bases de los genes naturales.

Dichas pruebas se obtuvieron en 1987. Peter B. Dervan, del Instituto de Tecnología de California, y Hélène, independientemente, confirmaron lo que Morgan y Wells habían demostrado con anterioridad en cadenas sintéticas de ADN bicatenario. En ciertas condiciones, los genes naturales que contenían sitios ricos en pares de bases *AT* y *GC* podían combinarse con un oligonucleótido diseñado para formar tripletes *TAT* y *C⁺GC*. Los tríplices se producían siempre que una de las cadenas del ADN dúplice diana portase la mayoría de las bases púricas (adenina y guanina) y la otra las pirimidínicas (timina y citosina). Hoy sabemos que los oligonucleótidos suelen unirse a una de las cadenas de la doble hélice, y sólo a las bases púricas de esa cadena.

Los descubrimientos de Dervan y Hélène eran muy sugestivos. Sin embargo, aún persistía un serio obstáculo contra la terapia fundada en los tríplices. Según cabía esperar de los resultados de Morgan y Wells, los tríplices sólo se formaban en condiciones acídicas, que no son las fisiológicas.

Dervan logró soslayar en parte el problema añadiendo un átomo de yodo o un grupo metilo a los oligonucleótidos habituales. En 1988, uno de los autores (Hogan) y sus colaboradores de la Universidad de Princeton emplearon con fortuna un método distinto, que además incrementaba la afinidad de los oligonucleótidos por sus dianas y generaba una nueva variedad de tríplices.

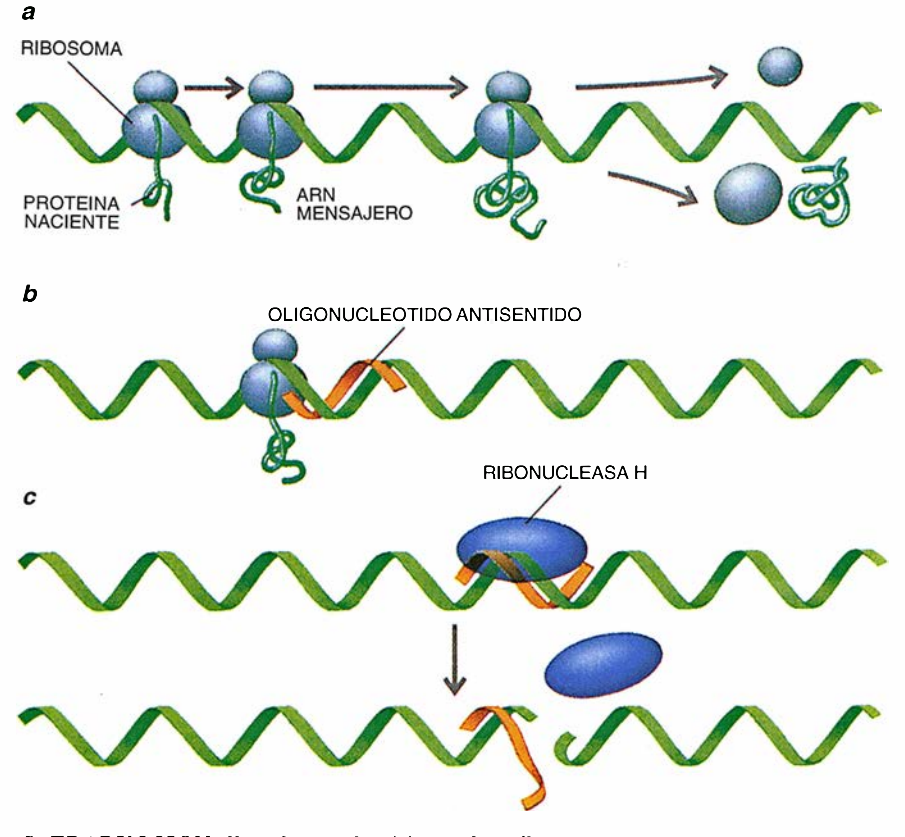
Observaron que, si introducían nucleótidos de guanina en los lugares donde había citosina en los oligonucleótidos diseñados para formar tríplices, se eliminaba la necesidad de acidificar el *p*H. Estos nuevos oligonucleótidos generaban tripletes *GGC*, en vez de la clase *C⁺GC*. Las guaninas de la cadena sintética enlazaban con las guaninas del ADN bicatenario.

El equipo de Hogan y otros demostraron posteriormente que los oligonucleótidos diseñados para formar tripletes *TAT* y *GGC* en las regiones reguladoras de los genes solían también unirse a las proteínas que normalmente reconocen esos sitios. Aparecía así la posibilidad de construir oligonucleótidos que impidiesen la unión de las proteínas reguladoras a sus genes correspondientes.

Para diseñar fármacos formadores de tríplices, había que conocer con exactitud de qué modo interaccionaba un determinado tipo de oligonucleótido con su diana. Se sabe ahora que los oligonucleótidos que forman tríplices no bloquean los puentes de hidrógeno que sustentan la doble hélice original. Cada base del oligonucleótido establece dos nuevos puentes de hidrógeno con una purina de la región diana del dúplice. Ocurre, además, que algunos oligonucleótidos se orientan en paralelo con sus dianas, y otros lo hacen de forma antiparalela. Las cadenas de ADN son asimétricas. Uno de sus extremos se designa 5′ y el otro 3′. En una doble hélice clásica, las cadenas son antiparalelas: el extremo 5′ de una de las cadenas queda junto al extremo 3′ de la otra. Los oligonucleótidos que contienen citosinas y timinas tienden a situarse en paralelo a la cadena rica en purinas del dúplice diana. Los que contienen guanina y timina tienden a colocarse de forma antiparalela. Si no se atiende a esas diferencias, nos encontraremos con que un oligonucleótido se muestra incapaz de reconocer a su ADN diana.

En 1988, y en el curso de unas investigaciones con el gen *c-myc*, relacionado con el cáncer, Edith H. Postel y Michel Cooney, del laboratorio de Hogan, demostraron que un oligonucleótido diseñado para formar un tríplice en la región controladora de un gen, inhibía la iniciación de la síntesis del ARN mensajero. Para ese experimento utilizaron un ensayo de transcripción libre de células: no emplearon células intactas, sino que mezclaron en un tubo de ensayo el gen, los oligonucleótidos y varios componentes celulares. Dervan, utilizando también un sistema libre de células, demostró posteriormente que un tríplice impedía la transcripción de ciertos genes víricos.

Resultados igualmente prometedores se han obtenido con otros genes. Se da ya por sentado que, al menos en el tubo de ensayo, se pueden diseñar oligonucleótidos que formen tríplices con las regiones controladoras de genes seleccionados, y que, por tanto, bloqueen la transcripción del ARN mensajero correspondiente. Pruebas recientes abonan también el diseño de oligonucleótidos dirigidos contra la región del gen que cifra la información de la proteína. En esos casos, el tríplice interrumpe el trabajo de la polimerasa de ARN, impidiendo la síntesis de ARN mensajero. Significa ello que, cuando no es posible impedir la iniciación de la transcripción, se pueden diseñar trí-



5. TRADUCCION, llevada a cabo (*a*) por los ribosomas, estructuras que recorren el ARN y van simultáneamente sintetizando las proteínas. La unión de un fármaco antisentido (*naranja*) al ARN puede inhibir la traducción de dos maneras, por lo menos. Puede impedir que los ribosomas comiencen o terminen su tarea (*b*). También pueden hacer que una enzima, la ribonucleasa H, corte al ARN por el sitio donde se une el fármaco (*c*). El ARN roto no puede traducirse y se degrada rápidamente.




6. CELULAS CANCEROSAS (*puntos oscuros*) infiltradas en la cavidad craneal (*zona blanquecina*) de un ratón leucémico (*izquierda*). En un ratón leucémico tratado con un oligonucleótido antisentido dirigido contra el gen *c-myb*, relacionado con el cáncer, las células no invaden dichas áreas (*derecha*). Investigadores de la Universidad de Pennsylvania realizan ahora ensayos con la misma droga en pacientes afectados de leucemia.

plices para frustrarla en su fase de desarrollo.

Los estudios realizados con células vivas son un argumento de peso en favor del recurso a los tríplices para luchar contra ciertas enfermedades. Los oligonucleótidos dirigidos contra la región controladora del gen que cifra el receptor de la interleucina-2, lo ha demostrado Hélène, inhiben la expresión de dicho gen. Por su parte, Postel y otros, del laboratorio de Hogan, han comprobado que un oligonucleótido dirigido contra la región reguladora del gen *c-myc* humano bloquea la transcripción del gen en una línea celular humana cancerosa. Otros laboratorios han diseñado oligonucleótidos que reducen, en células vivas, la transcripción de diversos genes víricos relacionados con el cáncer. Aunque no se conocen datos de ensayos realizados con animales ni existe ningún experimento con humanos, el panorama podría cambiar en los próximos años.

No quiere ello decir que nos espera un camino de rosas. A las dificultades habituales que encontramos en la solución de cualquier problema científico, hay que añadir aquí las inherentes a los propios fármacos. La dosis justa es una de ellas: los oligonucleótidos construidos para inhibir la transcripción dentro de las células sólo resultan eficaces si se emplean en elevadas concentraciones; de ahí que una línea de investigación esté consagrada a rebajar dichas dosis.

Topamos también con otra limitación mucho más restrictiva, a saber, la que nos dice que las dianas deben presentar sus purinas en la misma cadena. Poco puede hacerse contra eso, de momento. Ocurre, sin embargo, que más de la mitad de las dianas potenciales en el ADN dúplice contiene purinas y pirimidinas mezcladas en cada cadena. Como primera solución de ese problema, Dervan y sus colegas han sustituido los grupos fosfato de los oligómeros por grupos químicos que hacen que el oligonucleótido salte de una cadena a otra. Se investigan también cambios estructurales aún más refinados. Tarde o temprano, se conseguirá ampliar el abanico de dianas de ADN accesibles a los oligonucleótidos formadores de tríplices.

Las estrategias basadas en las cadenas antisentido y tríplices están aún lejos de la perfección. Pero, considerados los éxitos obtenidos en los últimos años, todo indica que las mejoras son sólo cuestión de tiempo. Albergamos la esperanza de que, un día no muy lejano, estos fármacos constituyan un tratamiento rutinario de las enfermedades que carecen de otra terapia eficaz, así las de origen genético y vírico.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OLIGODEOXYNUCLEOTIDES: ANTISENSE INHIBITORS OF GENE EXPRESSION. Jack S. Cohen. Macmillan, 1989.

THE ANTI-GENE STRATEGY: CONTROL OF GENE EXPRESSION BY TRIPLEX-FORMING OLIGONUCLEOTIDES. Claude Hélène en *Anticancer Drug Design*, vol. 6, n.º 6, páginas 569-584; diciembre de 1991.

OLIGONUCLEOTIDE-DIRECTED DNA TRIPLE-HELIX FORMATION: AN APPROACH TO ARTIFICIAL REPRESSORS? L. James Maher III, Barbara Wold y Peter B. Dervan en *Antisense Research and Development*, vol. 1, n.º 3, págs. 227-281; otoño 1991.

ANTISENSE RESEARCH AND APPLICATIONS. Dirigido por Stanley T. Crooke y Bemard Lebleu. CRC Press, 1993.

La dualidad en la materia y en la luz

Según la mecánica cuántica, los objetos pueden comportarse como partículas o como ondas. A la luz de nuevos estudios, se pone ahora de relieve que esa complementariedad es más fundamental de lo que se venía considerando

Berthold-Georg Englert, Marlan O. Scully y Herbert Walther

En el microcosmos de la mecánica cuántica abundan los fenómenos que se burlan del sentido común. Muchos son consecuencia del principio de complementariedad, cuya manifestación más conocida es la dualidad onda-partícula. Un objeto microscópico —un fotón, un átomo, un electrón— se comporta en unos casos como una onda en el agua, en otros como una partícula discreta. Ambas características se complementan entre sí, para proporcionar una descripción completa del objeto. La idea de la complementariedad se enunció hace más de setenta años; por eso, creen todavía muchos físicos que no se trata sino de una consecuencia de la relación de incertidumbre. Según ésta, dos variables complementarias, la posición y el momento, por ejemplo, no se pueden medir a la vez con una precisión que vaya más allá de un límite fundamental. La relación de incertidumbre impide normalmente que se sepa todo del comportamiento de los objetos cuánticos; por tanto, nunca vemos que al mismo tiempo hagan de partículas y de ondas.

Recientemente, nos hemos esforzado, nosotros y otros colegas, en mostrar que la incertidumbre no es el único factor por el que la complementariedad se impone. Hemos concebido y analizado experimentos reales y mentales que escapan a la relación de incertidumbre, para "engañar" a los objetos cuánticos bajo estudio. Sin embargo, los resultados siempre descubren que la naturaleza se pone a sí misma a salvo de esas intromisiones: la complementariedad permanece intacta, aun cuando la relación de incertidumbre no desempeñe ningún papel. Nuestra conclusión es que la complementariedad sea más profunda de lo que se apreciaba; posee un carácter más general y fundamental en la mecánica cuántica que la ley de incertidumbre.

Ondas y partículas ofrecen un comportamiento distinto en el banco de pruebas. El aspecto ondulatorio se evidencia en forma de patrones de interferencia. Arrójense a la vez dos piedras a un estanque tranquilo; se verá que las ondas circulares que emergen acaban superponiéndose: se refuerzan unas a otras donde las crestas se encuentran con crestas y se extinguen mutuamente cuando crestas y valles se suman. El mismo fenómeno ocurre cuando una luz atraviesa dos rendijas, que hacen las veces de dos piedras. La onda luminosa viaja por ambas rejillas, y lo hace de suerte tal que, de cada rejilla, salen dos ondas menores. Estas se interfieren y, cuando se las proyecta en una pantalla, generan una serie de franjas luminosas y oscuras [*véase la figura 2*]. El comportamiento corpuscular, por contra, se manifiesta siempre en forma de fotones, que sin excepción aparecen como entidades indivisibles. Un detector adecuado cuenta un nú-



1. Niels Bohr y Albert Einstein analizan el experimento de las dos rendijas

mero discreto de fotones en vez de registrar una intensidad continua.

Obtenemos una manifestación más impresionante de los atributos de onda y de partícula si enviamos los fotones uno a uno por las rendijas. Cada fotón produce en tal caso una mancha en la pantalla. Pero si reunimos los resultados de varios sucesos, aflora un patrón de interferencia. (En concreto, el patrón de interferencia representa la probabilidad de que el fotón incida en un punto o en otro.)

Esta naturaleza dual de ondas y partículas tan contraria a la intuición no agota la complementariedad. La mayoría de los objetos cuánticos (un átomo de plata, digamos) tiene una estructura interna de la que resultan propiedades magnéticas. Las mediciones podrían hallar que los "polos" de esos "imanes" apuntan hacia arriba o hacia abajo, o a la izquierda o a la derecha. Pero nunca hallarán que apuntan "hacia arriba y a la izquierda". Por tanto, la propiedad de "hacia arriba o hacia abajo" es complementaria con la de "a la izquierda o a la derecha", de manera análoga a lo que acontece con el comportamiento ondulatorio y corpuscular.

Un aspecto más chocante, incluso misterioso, de las propiedades complementarias concierne a su predecibilidad. Supongamos que una medición arroja que nuestro imán microscópico apunta hacia arriba. Realicemos un segundo experimento para decidir si apunta a la izquierda o la derecha. Encontraremos que el resultado no es predecible en absoluto: la izquierda o la derecha saldrán con una probabilidad del cincuenta por ciento cada una. ¿Es que hay algo que no sabemos y con lo que sí podríamos hacer una predicción? No, el problema es más serio: el resultado de la medición izquierda-derecha no se puede conocer de antemano.

La razón de esta ignorancia reside en el principio de complementariedad. Afirma que no se pueden conocer a la vez los valores de dos variables relacionadas (es decir, complementarias), del estilo de si los imanes apuntan a la izquierda o a la derecha y arriba o abajo. Una información absolutamente precisa acerca de una variable significa que nada se puede saber de la otra. Los manuales suelen ilustrar esta ley tomando como propiedades complementarias la posición y el momento de una partícula. Cuanto más exacta sea la medición de la posición, menos lo será la información relativa al momento, y viceversa. El enunciado numérico preciso de esto es la relación de incertidumbre de Heisenberg.

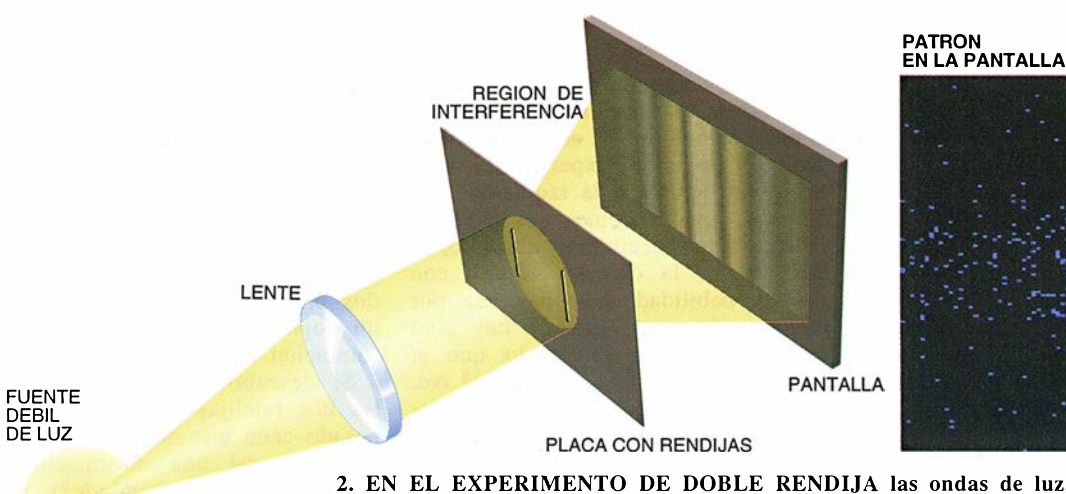
Del principio de complementariedad se sigue, lisa y llanamente, que en el microcosmos no cabe el conocimiento completo del futuro; lo que sí nos es permitido en física clásica. Si se conoce con seguridad una de dos propiedades complementarias de un objeto cuántico, se pierde la información acerca de la otra.

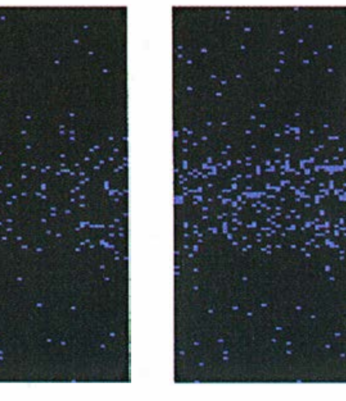
Si descubrimos en el montaje de las dos rendijas por qué rendija ha pasado cada uno de los fotones (adquiriendo así una información que responde a un *¿por dónde?*), perdemos el patrón de interferencia en la pantalla. Poseer la información que responde a un *por dónde* supone que en las rendijas tiene que haberse manifestado la naturaleza corpuscular de los fotones en vez de su naturaleza ondulatoria, necesaria para que se produzcan las franjas de interferencia. Podemos tener o la información que responde a la pregunta de por dónde o el patrón de interferencia, pero no las dos cosas a la vez. (Antes hemos dicho que la naturaleza corpuscular de los fotones se reconoce siempre cuando se los detecta en la pantalla, pero esa información no nos dice nada de lo que ocurre en las rendijas donde se origina el patrón de interferencia.)

Esta complementariedad es un rasgo de la realidad, y hemos de vivir con él. Nadie insistió más en ello que el físico danés Niels Bohr; a él le corresponde la parte del león del mérito de que atribuyamos a la complementariedad el rango de verdad fundamental. No fue fácil, y la resistencia opuesta por abogados del dia-



BERTHOLD-GEORG ENGLERT, MARLAN O. SCULLY y HERBERT WALTHER sienten un mismo interés por los fundamentos de la mecánica cuántica. Englert, que se doctoró por la Universidad de Tubinga y ha sido profesor invitado en Nuevo México, Polonia, Hungría y Francia, hoy enseña en la de Munich. Es también investigador del Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching. Scully, doctor por Yale, ha ganado muchas distinciones de óptica cuántica. Comparte la docencia en la Universidad A&M de Texas con la investigación en el Centro de Investigaciones Avanzadas de Houston y del Instituto Max Planck de Optica Cuántica. Walther, doctor por Heidelberg, es profesor de la Universidad de Munich y dirige el Instituto de Optica Cuántica de Garching. Ha recibido numerosas distinciones y títulos honoríficos, y pertenece a los consejos de varias revistas y sociedades científicas.





2. EN EL EXPERIMENTO DE DOBLE RENDIJA las ondas de luz, colimadas por una lente, iluminan una placa con dos rendijas, que actúan como fuentes de ondas circulares. Las ondas se interfieren, formándose las franjas luminosas y oscuras. En este experimento se envían los fotones uno a uno, de manera que el patrón de franjas se vaya constituyendo a medida que se registran más fotones. Los colores que aparecen en la pantalla representan

blo tan prominentes como el mismísimo Albert Einstein fue formidable. Sus discusiones hacían sobre todo hincapié en si sería posible medir a la vez propiedades complementarias. He aquí la transcripción imaginaria de uno de sus muchos debates esclarecedores:

Bohr: Veo que estás bosquejando una vez más un experimento de las dos rendijas. ¿Qué te traes ahora entre manos?

Einstein: Espera sólo, Niels, a que termine. Venga [*véase recuadro*]. Una onda de luz plana ilumina una superficie plana que tiene dos rendijas a través de las cuales la luz puede llegar a una pantalla. Con tal de que la geometría del montaje sea la correcta, aparecerá un patrón de interferencia en la pantalla, una serie de bandas iluminadas y oscuras.

B: Eso es lo que les enseñamos a nuestros alumnos. ¿Dónde está la novedad?

E: Ten paciencia, por favor. Antes de que exponga la idea nueva, déjame que cuente las viejas, para que haya seguridad de que estamos de acuerdo por lo que a ellas se refiere. No pondrás objeción alguna a que se diga que el patrón de interferencia demuestra la naturaleza ondulatoria de la luz, ¿no?

B: Por supuesto que no.

E: También estarás de acuerdo en que, de lo que tú llamas complementariedad, se sigue que no hay manera de saber por qué rendija pasó cualquiera de los fotones que llegan a la pantalla, donde ponen su grano de arena en el patrón de interferencia.

B: Así es justamente

E: Bueno, ya sabes que siempre me ha costado creer que el Señor deba jugar a los dados. Permíteme ya que te cuente el giro nuevo que le ha dado al asunto. Contrariamente a lo que acabamos de explicar, sí puedo decir por qué rendija vino el fotón. Supón que vemos que da en la pantalla donde esté el primer máximo lateral, es decir, en una de las bandas brillantes que caen más cerca del centro del patrón. Para que el fotón llegue hasta ahí, la rendija por donde pase tiene que desviarlo.

Pero como nos enseñó Isaac Newton, no hay acción sin reacción. Por consiguiente, cuando la lámina de la rendija da un empellón al fotón, el fotón le da un empellón recíproco a la lámina. Y la intensidad del empellón dependerá de la rendija por donde pase el fotón. Si se suspende la lámina de una manera sensible, puedo, en principio, registrar su retroceso. Su magnitud me dirá por qué rendija pasó el fotón.

B: ¡Ajá! Tendrías así una información que respondería, para cada fotón, al correspondiente *¿por dónde?*, y en el mismo experimento observarías un patrón de interferencia.

E: Sí.

B: Pero ello es incompatible con la complementariedad.

E: Cierto.

B: Es un buen intento, pero me temo que has pasado algo por alto: las propiedades cuánticas de la lámina de las rendijas. Puedo explicar el razonamiento con matemáticas [*véase recuadro*]. Mas, por venir al meollo de la cuestión, de lo que se trata es de que, para observar el patrón de interferencia, la posición de la lámina debe fijarse con bastante precisión.

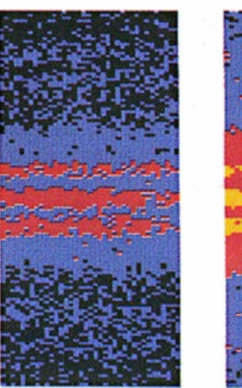
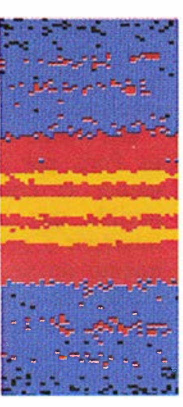
E: Así es. De lo contrario, no se formaría el patrón de franjas de la doble rendija y observaríamos el patrón de dispersión de una sola rendija.

B: Ahora bien, para distinguir un camino del otro hemos de saber con bastante precisión el momento de la lámina cuando retrocede. De hecho, puedo mostrar que el patrón de interferencia aparece sólo si las incertidumbres tanto de la posición de la lámina de las rendijas como del momento con que retrocede son tan pequeñas, que resultan incompatibles con la relación de incertidumbre.

E: Vale, vale, Niels, tú ganas. Acepto que no se puede tener la información que responde a un *por dónde* y el patrón de interferencia en un mismo experimento. Tienes toda la razón al insistir en que la lámina con la rendija ha de respetar también las leyes de la mecánica cuántica. He de rendirte gustosamente mis cumplidos por esta demostración de la complementariedad.

B: Guárdalos. ¿Crees que la relación de Heisenberg —la de arriba o una de sus variantes— es siempre el mecanismo por el que se impone la complementariedad?

Sólo podemos conjeturar qué habría respondido Einstein a la última pregunta. Para nosotros, la respuesta es no. Las restricciones que establece la relación de incertidumbre no son el único mecanismo por el que la naturaleza impone la complementariedad. La respuesta negativa está justificada porque hemos encontrado que es posible construir detectores de *por dónde* pasan los objetos observados que no afectan al movimiento de éstos de manera significativa. Es decir, hemos concebido

el número de impactos de fotones: de uno a nueve (*azul*), de 10 a 99 (*rojo*) y cien o más (*amarillo*). Realizó el experimento Gerhard Birkl, del Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching.

detectores *de paso*, o de camino, que eluden la relación de incertidumbre.

La idea del nuevo detector de paso se deriva de una de las variantes posibles del montaje de las dos rendijas. Richard Feynman examinó cierta variante en su admirable introducción a la mecánica cuántica en el tercer volumen de sus *Lectures on Physics*. Hacía allí la interesante observación de que, si se usasen electrones en vez de fotones, se dispondría de otra manera de escrutar las partículas de interferencia. Tenía en mente que los electrones, lo mismo que los fotones, llevan en su propia naturaleza aspectos ondulatorios; en un experimento de doble rendija, pues, también generarían un patrón de interferencia. Pero como los electrones están dotados de carga, reaccionan con los campos electromagnéticos, la luz incluida. En consecuencia, dispersan la luz, y podemos así obtener información que responda a la pregunta de *por dónde*.

Feynman propuso un método específico para conseguirlo: colóquese una fuente de luz simétricamente entre las dos rendijas; los fotones rebotarán en los electrones, y su dirección de movimiento le dirá al experimentador si se originan cerca de la rendija superior o de la inferior.

El análisis de Feynman del proceso de colisión de los electrones y los fotones se centra en dos variables. Una es el momento que el empellón le transfiere al electrón. La segunda es la incertidumbre de la precisión con que se determina la posición del electrón. De manera muy parecida a lo que ocurre en la variante de la rendija con retroceso de Einstein, si se desean tanto la información que responde al *por dónde* como el patrón de interferencia, ambas cantidades han de ser muy pequeñas, menores, de hecho, de lo que permite la relación de incertidumbre de Heisenberg.

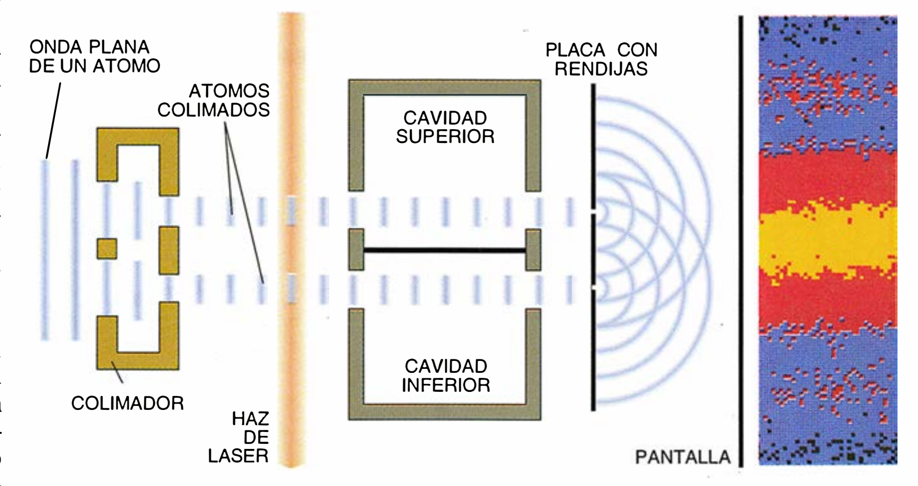
El nuevo *detector de paso* sigue la propuesta de Feynman, pero hemos dispuesto el montaje de forma que evite las transferencias de momento. Nuestro experimento mental no usa electrones como partículas de interferencia, sino átomos. Colocamos una pequeña cavidad —en esencia una caja— delante de cada rendija, de suerte que todos los átomos deban pasar por una u otra antes de llegar a las rejillas [*véase la figura 3*]. En la Universidad de Munich, el Instituto Max Planck, el Instituto de Optica Cuántica de Garching, la Universidad de Yale y la Ecole Normale Supérieure de París se han hecho en los últimos años progresos enormes en el desarrollo de las técnicas experimentales que se precisan. Pueden ahora realizarse rutinariamente experimentos en los que átomos sueltos atraviesan cavidades.

Sintonizaríamos el láser de manera que cada átomo que pasase por él se excitara; es decir, de forma que absorbiese del láser un fotón de longitud de onda corta y saltara a un estado de energía mayor. La geometría de las cavidades es tal, que fuerza a los átomos excitados a emitir un fotón de longitud de onda más larga. (Estas longitudes de onda son comparables con las de la radiación de un horno de microondas.) La localización del fotón de mayor longitud de onda indicaría por qué cavidad, y por tanto por qué rendija, pasó ese átomo en concreto. Este montaje no es presa de la relación de incertidumbre de Heisenberg, ya que la emisión del fotón en la cavidad no perturba el movimiento del átomo. Para minimizar las señales extrañas, las cavidades de los experimentos reales se mantendrían ultrafrías. Tendrían, además, paredes superconductoras para garantizar que los fotones se almacenarían dentro de ellas durante un largo tiempo.

Habida cuenta de que el mecanismo de detección no perturba el movimiento de los átomos, cabría suponer que el átomo conservaría todavía su capacidad de interferencia. En otras palabras, tendríamos información sobre el *por dónde*, que indicaría la naturaleza corpuscular del átomo, y un patrón de franjas, señal de su naturaleza ondulatoria.

Esta suposición ingenua es errónea. Nuestro análisis revela que la información que responde al *por dónde* y el patrón de interferencia siguen siendo mutuamente excluyentes. En cuanto obtenemos aquélla, el patrón de franjas de la pantalla desaparece. Nos queda en su lugar un gran manchón en medio de la pantalla. Podemos escapar a la relación de incertidumbre de Heisenberg, pero no al principio de complementariedad de Bohr.

La manera en que la complementariedad se preserva es bastante sutil. Descansa en las correlaciones existentes entre la libertad de movimientos del átomo y los fotones de cavidad; son la causa de la pérdida del patrón de interferencia. Es como si los átomos llevasen etiquetas que dijesen por qué rendija pasaron, y los átomos que lo hicieron por la de arriba no interfiriesen con los que fueron por abajo. La etiqueta es el fotón chivato



3. EL DETECTOR DE PASO usa un haz de láser para excitar los átomos colimados (que se manifiestan como ondas); los átomos caen a un nivel de energía más bajo al emitir un fotón en la cavidad por la que transiten. Como esta emisión no afecta al movimiento de los átomos, la relación de incertidumbre no se aplica. Sin embargo, el análisis revela que la información que dice *por dónde* han pasado los átomos suprime las franjas de interferencia.

que queda atrás: un fotón arrancado, pero etiqueta al fin y al cabo. La pantalla donde se manifestarían las propiedades de interferencia podría estar a cualquier distancia de las cavidades del detector de paso. Pero eso no importa. Una vez se establecen las correlaciones entre un átomo etiquetado y la cavidad donde entra, permanecen intactas.

Al llegar a este punto, el intuicionista clásico, IC, ya no puede mantener más la calma. Se vuelve a su amigo el mecanocuántico, MC, y le espeta:

IC: Hasta aquí, he escuchado pacientemente, pero esto ya es demasiado. Estoy dispuesto a aceptar los argumentos anteriores, los basados en la relación de incertidumbre de Heisenberg, y que la presencia de la información que responde a un *por dónde* excluye el patrón de interferencia. Pero eso, seguramente, se debe a que el experimentador, al obtener esa información, perturba el movimiento de la partícula, lo que a su vez hace que ésta pierda su capacidad de interferir.

MC: Cuando dices que perturba, ¿piensas en una especie de empellón incontrolable?

IC: Sí, por supuesto.

MC: Entonces te equivocas. El ejemplo de los detectores de cavidad demuestra que puedes tener una información que responde al *por dónde* sin esas perturbaciones mecánicas.

IC: Puedo seguir tu razonamiento. Pero, por favor, ayúdame a entender la conclusión. ¿Cómo es posible que la partícula deje de interferir a pesar de que su movimiento no se altera?

MC: El truco lo hacen las correlaciones que se establecen.

IC: Lo siento, pero la palabra mágica "correlaciones" no me ayuda.

MC: Bueno, entonces podría ser útil una analogía. Simboliza las dos posibilidades —que el átomo

La complementariedad respaldada por la incertidumbre

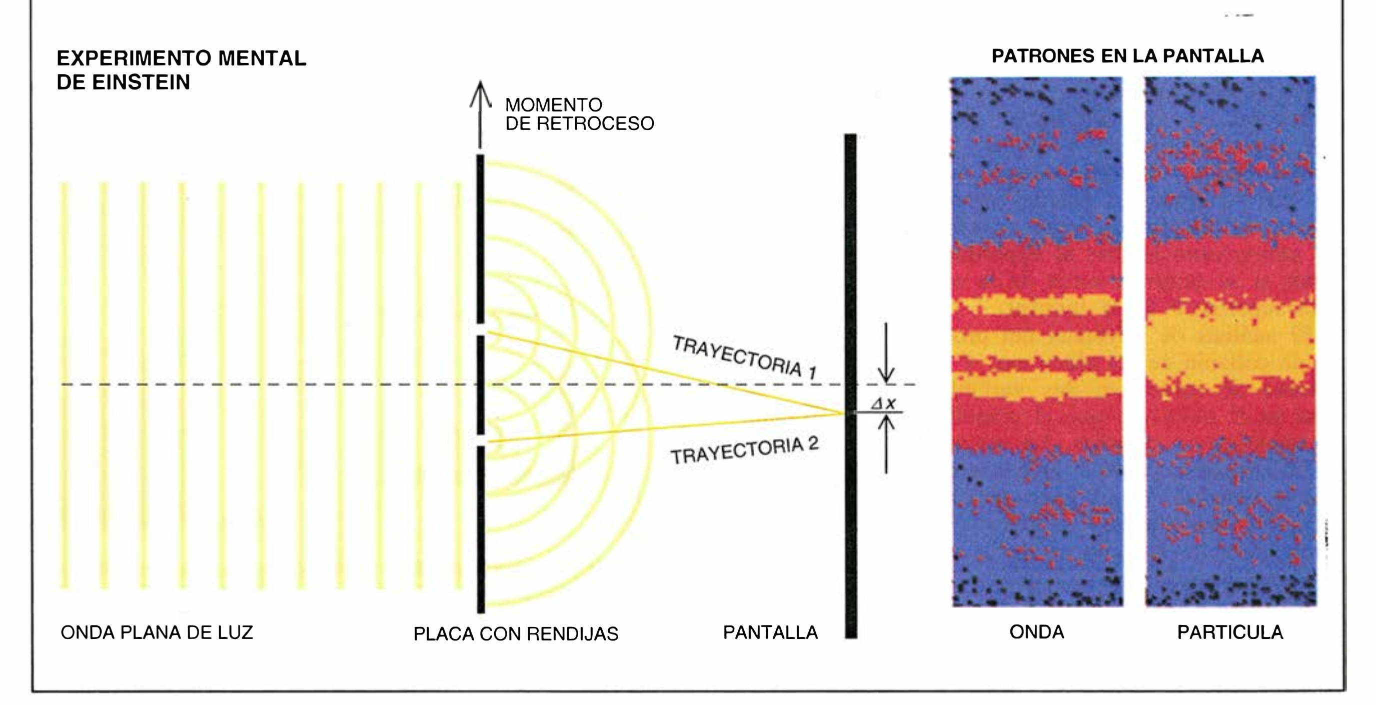
En la conversación imaginaria, Niels Bohr le explica a Albert Einstein por qué el supuesto *detector de paso* de éste no puede funcionar: sería incompatible con la relación de incertidumbre. Deducimos aquí la razón cuantitativa de ello.

En primer lugar, denotamos la distancia de la banda central brillante a la primera banda lateral por Δx. A continuación, se fija la posición de la placa donde se abren las rendijas respecto a la pantalla con bastante precisión —es decir, con una incertidumbre δx claramente menor que Δx. De lo contrario, el patrón de franjas de doble rendija no se formaría, y sólo aparecería el patrón de dispersión de una rendija.

Einstein quería observar el retroceso de la placa de las rendijas para reunir la información de *por dónde* pasaban los fotones. El momento de un fotón es igual a $h\nu/c$, donde h es la constante de Planck, ν es la frecuencia del fotón y c la velocidad de la luz. (Este momento del fotón tiene tres componentes espaciales, pero aquí nos interesa sólo el cambio que experimenta la componente paralela a la placa.) La magnitud del momento de retroceso que el fotón le da a la placa tendría que depender de la rendija por la que pasase (ya que una de las rendijas habría de desviarle más que la otra para que fuese a parar al primer máximo lateral). Un poco de álgebra mostrará que el momento dado a las dos rendijas diferirá en $h/\Delta x$.

Para descubrir la trayectoria del fotón, debemos saber el momento de la superficie con las rendijas con una precisión, δp, menor que esa diferencia. Expresamos matemáticamente la relación de la forma $\delta p < h/\Delta x$. Como δx y δp tienen que ser mucho menores que Δx y $h/\Delta x$ respectivamente, el producto $\delta x \delta p$ habrá de ser mucho menor que la constante de Planck, h; con símbolos, $\delta x \delta p \ll h$. Y así llegamos a un requisito que no se puede cumplir, habida cuenta de la relación de incertidumbre de Heisenberg, $\delta x \delta p \geq h/4\pi$, que ha de satisfacerse en toda circunstancia.

En conclusión, o bien δx ha de ser demasiado grande para que pueda formarse un patrón de interferencia o bien δp ha de ser demasiado grande para que se distinga una trayectoria de la otra. El argumento resulta especialmente convincente porque el requisito final de que $\delta x \delta p \ll h$ no depende del detalle del patrón de interferencia, ni aun cuando la magnitud Δx —el intervalo entre las franjas— aparezca en los pasos intermedios del razonamiento.



pase por la rendija superior o que lo haga por la inferior— con dos líneas garabateadas en un plano horizontal [*véase la figura 4*]. Diremos que las curvas se interfieren cuando se corten; dibujémoslas de manera que eso ocurra muchas veces.

CI: Muy bien, sigamos.

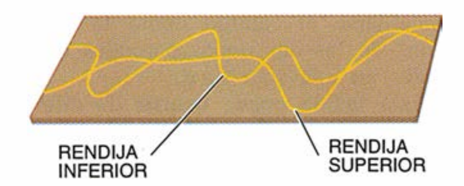
MC: Introduzcamos ahora un grado adicional de libertad; en la analogía, la tercera dimensión. Las correlaciones se simbolizan levantando una de las líneas a un plano que esté unos centímetros sobre el primero. Las curvas dejan entonces de cortarse, es decir, deja de haber interferencias. Y observa que el prescindir de las correlaciones, lo que se logra ignorando la tercera dimensión y proyectando las dos curvas sobre un plano común, hace que parezca que las líneas se cortan, aunque en realidad discurren una sobre otra.

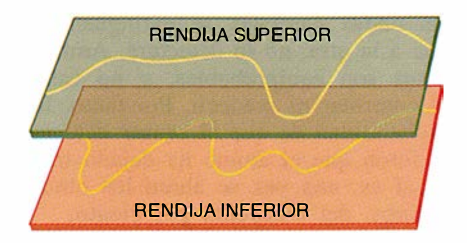
CI: ¡Ajá!, me parece que tengo ahora una comprensión intuitiva mucho mejor de lo que acontece. En resumen, el patrón de interferencia se pierde porque la información que responde a un *por dónde* se ha vuelto disponible, y ello no se debe en absoluto a una incertidumbre en la posición de las rendijas o a un empellón incontrolado que se le haya dado al átomo.

MC: Sí, no entra nada que tenga carácter aleatorio.

En vista de la historia de la disciplina, con tantos libros de texto que sacan a colación la relación de incertidumbre, muchos colegas reflexivos no han dejado de mostrarse escépticos ante nuestro análisis y han presentado sutiles objeciones a la conclusión de que el movimiento del átomo no se perturba. Pero unos cálculos cuidadosos y el experimento que se efectuó hace poco en el laboratorio de David J. Wineland, del norteamericano Instituto Nacional de Pesos y Medidas en Boulder, han demostrado de forma convincente que todas esas objeciones carecen de validez. El principio de complementariedad es, sin duda alguna, más fundamental que la relación de incertidumbre.

Dado que la información que responde al *por dónde* suprime los patrones de interferencia, podemos plantear la pregunta inversa, relativa a la complementariedad. Supóngase que borramos la información de por dónde pasa una partícula absorbiendo el fotón chivato. ¿No debería reaparecer el patrón de interferencia?





4. LAS CURVAS SOBRE EL PLANO representan si un átomo pasa por la rendija superior o por la inferior (*arriba*). Las franjas de interferencia vienen representadas por los puntos de corte. Pero si se establecen correlaciones (*abajo*), se tiene que las dos curvas se encuentran en planos diferentes. Ya no se cortan, ni hay interferencias.

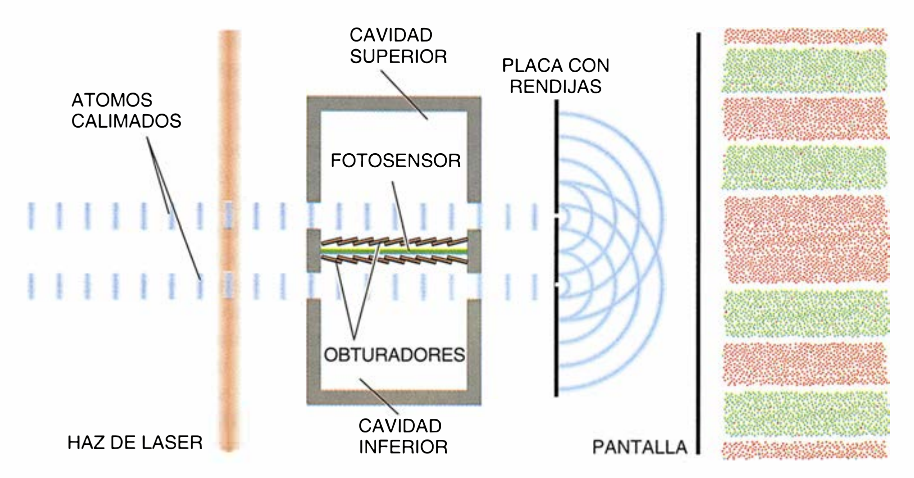
Da la impresión de que este proceso de borradura cuántica tiene sentido, si bien borrar meramente la información no bastará para que vuelva el patrón de interferencia. Es verdad que éste indica que se carece de información que responda a un *por dónde*; de la misma manera, esa información suprime el patrón de interferencia. Pero la conclusión de que la carencia de tal información implica la presencia del patrón de interferencia es un *non sequitur*. La respuesta a la pregunta de si reaparecerá el patrón es, pues, sí, siempre y cuando la borradura conduzca a nuevas correlaciones. Por tanto, se ha de borrar en circunstancias bien controladas.

La realización experimental de un borrador cuántico es sumamente difícil y no se ha conseguido todavía. En su lugar presentamos un experimento mental que, aunque supone varias idealizaciones, contiene correctamente todos los rasgos importantes.

En este montaje imaginario se instala un fotosensor entre las cavidades. Se aísla cada cavidad de la otra con obturadores [*véase la figura 5*]. Mientras los obturadores estén cerrados, tendremos el *detector de paso* descrito más arriba.

El experimento empieza con las cavidades vacías y los obturadores cerrados. Enviamos un átomo a través del aparato. Deja tras de sí un fotón en una de las cavidades. Claro está, la probabilidad de que sea en una en concreto es del cincuenta por ciento. Mientras el fotón permanece en una de las cavidades, el átomo llega a la pantalla, donde deja una marca. Una vez sucedido esto, abrimos simultáneamente los obturadores, con lo que las dos cavidades se convierten en una sola, mayor.

La abertura de los obturadores tiene un efecto insólito en el fotón. Cabría suponer que éste puede encontrarse entonces en cualquier parte; el sensor, pues, registrará siempre una señal. Pero el fotón es una criatura cuántica. Goza de propiedades ondulatorias. Recuérdese que, antes de que se abran los obturadores, el fotón tiene las mismas oportunidades de estar en cada una de las cavidades. Otra forma de ver qué acontece es considerar que la onda asociada al fotón consta de dos ondas parciales, una en cada cavidad. Entonces, cuando se abren los obturadores, la onda del fotón cambia para adaptarse a la nueva y mayor cavidad. Cabe



5. EL BORRADOR CUANTICO es una variante del detector de paso. Una vez ha dado un átomo en la pantalla, los obturadores se abren. Si el sensor absorbe el fotón de la cavidad, la mancha de la pantalla se marca en rojo; si no, en verde. Las manchas rojas producen franjas de interferencia; las verdes generan un patrón complementario.



imaginarse el cambio como la "fusión" de las dos ondas parciales iniciales en una sola final.

Esta fusión puede ocurrir de diferentes maneras. Si las dos ondas parciales se refuerzan mutuamente donde se encuentra el fotosensor, éste capta el fotón; por el contrario, si las ondas parciales se extinguen la una a la otra, no lo detectará. Ambos casos son equiprobables, y no cabe ni controlar ni predecir. Por tanto, la probabilidad de que el sensor detecte el fotón que el átomo ha dejado tras de sí es, una vez se abren los obturadores, del cincuenta por ciento.

Si el sensor absorbe el fotón, la marca de la pantalla se pinta de rojo, para indicar que se ha borrado el fotón de la cavidad. Si el sensor no registra nada, pintamos de verde la marca. Y empezamos de nuevo con el átomo siguiente. La mitad de los átomos contribuirá al conjunto de marcas rojas, la otra al de marcas verdes.

¿Qué tipo de patrón debería salir en la pantalla? Al final, todas las marcas rojas formarán el patrón de interferencia que se obtendría con las dos rendijas solas, sin las cavidades del *detector de paso*. Por consiguiente, la borradura del fotón chivato reintegra el patrón de interferencia. El conjunto de manchas verdes mostrará el patrón complementario: crestas verdes donde están los valles rojos y viceversa. En una fotografía en blanco y negro de la pantalla no se vería el patrón de interferencia. Sólo al correlacionar los átomos con la reacción del fotosensor sale a la luz, nunca mejor dicho, el patrón.

Echando mano, otra vez, de la analogía propuesta por MC de las curvas que se cortan en un plano, cabe decir que durante la borradura se reconoce que las curvas de arriba y de abajo son, respectivamente, las ramas verdes y rojas, desplazadas a los planos correspondientes. Las ramas rojas interfieren entre sí, y lo mismo vale para las verdes; pero como aquéllas no interfieren con éstas, para que se reconozca el patrón de interferencia hay que mantenerlas separadas.

La borradura ocurre después de que el átomo dé en la pantalla; está claro, pues, que no puede influir en el movimiento atómico. A los experimentadores les toca la elección: ¿Queremos saber si estamos registrando un átomo "de la rendija superior" o de la inferior, o nos interesa la propiedad complementaria de si ha excitado el sensor de fotones de microondas (rojo) o no (verde)? Es imposible hacer ambas cosas al mismo tiempo: no cabe pegar etiquetas que digan "rendija superior" y "rojo", lo mismo que no está a nuestra disposición el describir las propiedades magnéticas de un átomo de plata con la caracterización "hacia arriba y a la izquierda". La complementariedad actúa de nuevo.

El procedimiento de borradura que se acaba de describir tiene la ventaja de que se expone y analiza de inmediato. El experimento propiamente dicho es otra cosa; harán falta todavía un par de años para realizarlo. El primer obstáculo estriba en la fragilidad de los átomos excitados, que se destruyen fácilmente.

El primer experimento de borradura quizá no emplee átomos como objetos de interferencia. La verdad es que muchos de los interferómetros más avanzados ni siquiera se basan en rendijas. Para estudiar estas ideas se usan en los laboratorios de Raymond Y. Chiao, de la Universidad de California en Berkeley, James D. Franson, de la Johns Hopkins, Leonard Mandel, de la de Rochester, Yanhua Shih, de la de Maryland, y Anton Zeilinger, de la de Innsbruck, pares de fotones. El reciente experimento del Instituto Nacional de Pesos y Medidas, antes mencionado, recurre a un *detector de paso*, libre de retroceso, para la luz que dispersan, en vez de un par de rendijas, dos átomos. Modificando este experimento podría obtenerse otro de borradura cuántica.

Pero no esperamos que los resultados refuten la mecánica cuántica. El mundo cuántico se protege cuidadosamente de las contradicciones internas, y, si se produjera un hallazgo inesperado, lo más probable sería que indicase que algo había funcionado mal en el aparato, no en la mecánica cuántica. A pesar del ingenio experimental de los seres humanos, la naturaleza, qué duda cabe, irá, como poco, un paso por delante.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUANTUM OPTICAL TESTS OF COMPLEMENTARITY. M. O. Scully, B.-G. Englert y H. Walther, en *Nature*, vol. 351, número 6322, págs. 111-116; 9 de mayo, 1991.

YOUNG'S INTERFERENCE EXPERIMENT WITH LIGHT SCATTERED FROM TWO ATOMS. U. Eichmann *et al.*, en *Physical Review Letters*, vol. 70, n.º 16, págs. 2359-2362; 19 de abril, 1993.

THE MICROMASER: A PROVING GROUND FOR QUANTUM PHYSICS. Georg Raithel, Christian Wagner, H. Walther, L. M. Narducci y M. O. Scully, en *Cavity Quantum Electrodynamics*. A cargo de Paul. R. Berman. Academic Press, 1994.



Fósiles de Flaming Cliffs

El desierto de Gobi, en Mongolia, encierra uno de los conjuntos más pródigos en restos de dinosaurios. Los paleontólogos están desenterrando la historia biológica de la región

Michael J. Novacek, Mark Norell, Malcolm C. McKenna y James Clark

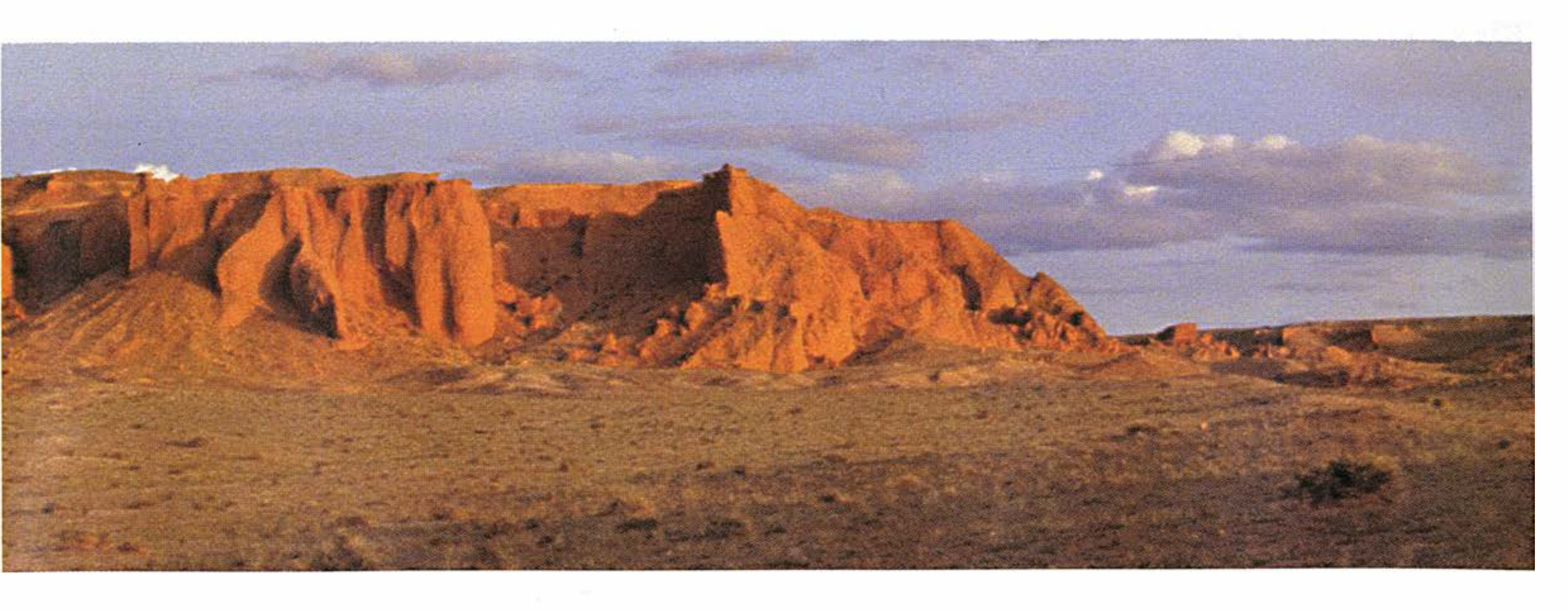
El desierto de Gobi, situado en Asia Central, es un lugar desolado. Comprende una superficie de millón y medio de kilómetros cuadrados, de dunas de arena, tierras desgastadas por la erosión y montañas de bordes dentados. En él se alterna un verano de fuego debido a la alta latitud del sol con el invierno helado que traen los vientos siberianos. No es recomendable como lugar para explorar si no vamos muy bien equipados: para atravesar inmensas áreas despobladas, salpicadas por algún que otro oasis, se requiere una planificación cuidadosa. Existen pocos mapas, y los satélites constituyen una ayuda limitada para cualquier viajero que haya de elegir entre los múltiples caminos, de profundos surcos, que se cruzan entre sí sin orden alguno, y que son tan impredecibles como los poblados nómadas que conectan.

MICHAEL J. NOVACEK, MARK NORELL, MALCOLM C. McKENNA y JAMES CLARK han explorado juntos los yacimientos de fósiles del desierto de Gobi bajo los auspicios del Museo Americano de Historia Natural y la Academia de las Ciencias de Mongolia. Novacek, Norell y McKenna son conservadores del Museo, del que Novacek es vicepresidente.

En contrapartida, el Gobi es un paraíso para los paleontólogos. Sus tierras erosionadas dejan al descubierto esqueletos casi completos de seres que sólo se conocían a través de esmeradas reconstrucciones, hechas a partir de unos cuantos huesos dispersos. A lo largo de nuestras campañas hemos hallado dinosaurios, lagartos y micromamíferos en un estado de conservación insólito. Algunos de los esqueletos que afloraron hace poco, fósiles de 80 millones de años de antigüedad, podrían tomarse por restos recientes de cadáveres. Los esqueletos y cráneos que hemos encontrado aparecen completos o casi completos, cuando lo habitual en la recuperación paleontológica son las "piezas de recambio": mandíbulas fragmentadas, dientes y huesos aislados.

Se desconoce la razón del llamativo estado de conservación de los fósiles del Gobi. En otras zonas ricas en ejemplares, como es el caso de las Montañas Rocosas, los arroyos y ríos transportaron los restos animales hasta los yacimientos de fósiles, desparramándolos a lo largo del trayecto. Pero el entorno del Gobi a finales del Cretácico pudo haber sido similar al actual: valles abiertos de dunas de arena y farallones, regados de forma aleatoria por pequeños lagos estacionales o por arroyos. De hecho, en algunas secciones de las rocas se aprecian indicios de antiguas dunas.

Es evidente también que los animales quedaron enterrados nada más morir, antes de que intervinieran los carroñeros o los factores meteorológicos. Los estratos de arenisca que aparecen desordenados en las formaciones rocosas cretácicas evocan los típicos depósitos que se observarían en unas condiciones dominadas por violentas tormentas de arena. El equipo de Tomasz Jerzykiewicz, que estudió estratos con fósiles en la Región Autónoma de Mongolia Interior en China, halló que los fósiles de vertebrados estaban frecuentemente incluidos en dichas capas. Estas tormentas no sólo pudieron enterrar los cadáveres, sino también haber matado a los animales. En cosa de unos minutos o unas pocas horas quedaron enterrados y, 80 millones de años después, sus restos emergen casi inalterados.



1. ESCARPES DE ARENISCAS del sur de Mongolia. Ocuparon las primeras páginas de los periódicos a principios de los años veinte, cuando los paleontólogos descubrieron allí huevos de dinosaurios.

Mongolia tardó en mostrar a la ciencia sus entrañas prehistóricas. A finales del siglo XIX y principios del XX, la meca de la paleontología de vertebrados se encontraba en las Montañas Rocosas. Pero en 1922 Roy Chapman Andrews encabezó una expedición hacia el corazón del Gobi que habría de cambiar la geografía mundial de los yacimientos fosilíferos. No llegaría a dar cumplimiento a su principal objetivo: la búsqueda del origen del hombre en Asia Central, pues muy pronto el interés de los expedicionarios se centraría en una sucesión de descubrimientos espectaculares, de mayor antigüedad. El Gobi guarda un tesoro inagotable de dinosaurios, mamíferos y otros vertebrados.

Andrews narró las cinco expediciones en *La Nueva Conquista de Asia Central.* Los exploradores hubieron de hacer frente a grandes extensiones de dunas sin caminos, tormentas de arena y saqueo de bandidos. La caravana de Andrews formada por camellos y pesados Dodge, cuyo abastecimiento se convirtió en un gravísimo problema, avanzaba por la llanura ondulada del Gobi a la manera del *Algoy horkhi horkhi*, legendario gusano de arena de Mongolia.

En medio de tales dificultades se produjo uno de los descubrimientos más importantes. Hacia finales del primer trabajo de campo en 1922, la expedición partió para explorar una inmensa llanura al norte de las montañas Gurvan Saichan. Andaban irremediablemente perdidos, cuando Andrews ordenó detenerse al grupo cerca de un *ger* (tienda de campaña en forma de cúpula bizantina de los nómadas de Asia Central, también conocida como yurta). Mientras Andrews preguntaba a los soldados que se encontraban en el *ger* sobre la dirección a tomar, el fotógrafo del equipo, J. B. Shackleford, se apartó encaminándose hacia un promontorio rocoso. Al acercarse quedó deslumbrado por una imagen fantástica de farallones y acantilados rojizos... y fósiles.

Diez minutos después descubría el primer cráneo conocido de *Protoceratops*, dinosaurio de fuerte pico córneo y escudo cefálico, que desde entonces pasó a ser el principal fósil de referencia de finales del Cretácico de Asia Central. Lentamente y a lo largo del resto de la calurosa tarde, el equipo rescató más huesos e incluso un pequeño huevo que confundieron con el de un ave. Al verano siguiente regresaron y encontraron numerosísimos restos de dinosaurios, antiguos mamíferos y otros vertebrados, así como la primera agrupación de huevos fósiles de dinosaurios. Andrews bautizó este lugar como Flaming Cliffs ("Acantilados Flamígeros"), inspirado por el espléndido resplandor rojo anaranjado del cielo y por el brillo que los acantilados de arena adquirían con la puesta de sol.

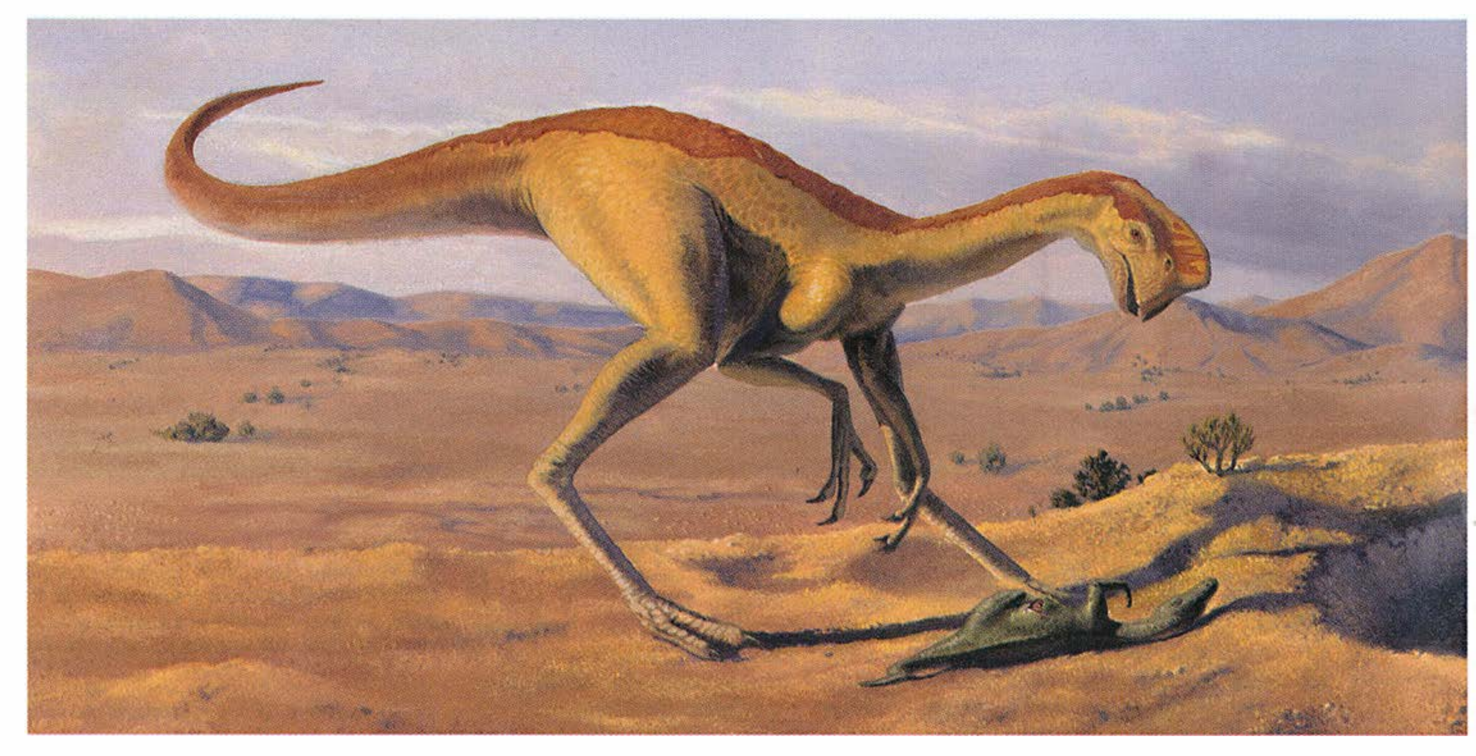
La inestable y poco propicia situación política de Mongolia obligó a Andrews a suspender sus campañas. Era a principios de los años treinta. El Gobi permaneció cerrado para la investigación de los paleontólogos occidentales durante más de 60 años. La continuidad del trabajo de Andrews quedó reservada a los científicos del bloque soviético. Entre 1946 y 1949, expediciones conjuntas de rusos y mongoles penetraron en la cuenca de Nemegt, una región desértica de imponente belleza, demasiado remota para que Andrews se animara a explorarla. Allí descubrieron tierras afectadas por la erosión muy ricas en fósiles del Cretácico y del Cenozoico.

Zofia Kielan-Jaworowska dirigió entre 1963 y 1971 un equipo de polacos y mongoles a la cuenca de Nemegt y otras zonas. Elaboraron una serie de monografías clásicas y montaron una espléndida exposición de dinosaurios y otros vertebrados fósiles en el Museo de Historia Natural de Ulan Bator, la capital de Mongolia. Desde la década de los sesenta, los paleontólogos mongoles han venido realizando campañas de excavación, solos o en colaboración con científicos de la antigua URSS.

Los occidentales regresaron en 1990, con las nuevas condiciones políticas del país. El verano de ese año, nuestros colegas de la Academia de Ciencias de Mongolia nos invitaron a un viaje de reconocimiento que preparó el terreno a cuatro nuevas expediciones durante los años siguientes. Grupos japoneses, alemanes y norteamericanos han iniciado también proyectos de campo.

El contraste entre el Gobi y otras zonas de fósiles más accesibles se ha incrementado, si cabe, desde los tiempos de Andrews. Hace un siglo, en los gloriosos días de la caza de los dinosaurios en el oeste americano, los buscadores tropezaban con valles y cañones donde los esqueletos estaban expuestos a la vista como cadáveres en campo de batalla, pero hoy muchas de esas tierras de dinosaurios están prácticamente esquilmadas.

Con todo, la actividad paleontológica en Mongolia a lo largo de los últimos setenta años no puede ni compararse con la realizada al otro lado del Pacífico. La erosión sigue exponiendo a la intemperie fósiles en abundancia, incluso en lugares ya minados por Andrews y otros. Además, las características difíciles del Gobi y su naturaleza inexplorada incrementan la probabilidad de que los paleontólogos tropiecen todavía con tierras totalmente vírgenes.



2. OVIRRAPTORIDO, dinosaurio carnívoro de gran tamaño, junto a su nido. Yacen los cuerpos de dos velocirraptores juveniles. Los autores encontraron un nido de ovirraptórido que contenía dos cráneos de dinosaurios infantiles de la misma

A principios de la campaña de 1993, junto con Demberelyin Dashzeveg, nuestro equipo partió hacia unas areniscas pardo-rojizas que apenas se distinguían, en la ladera norte del valle Nemegt, cerca de la base de Gilbent Uul, una cordillera de bordes irregulares. Dashzeveg comentó que las expediciones anteriores habían dejado de lado esa región en su avance por llegar hasta las tierras más prometedoras del oeste del valle Nemegt. Alcanzamos la zona, tras forcejear con una ventisca de varios kilómetros, y después de establecer un vivac donde nuestro camión cisterna y el remolque quedaron atrapados en la arena.

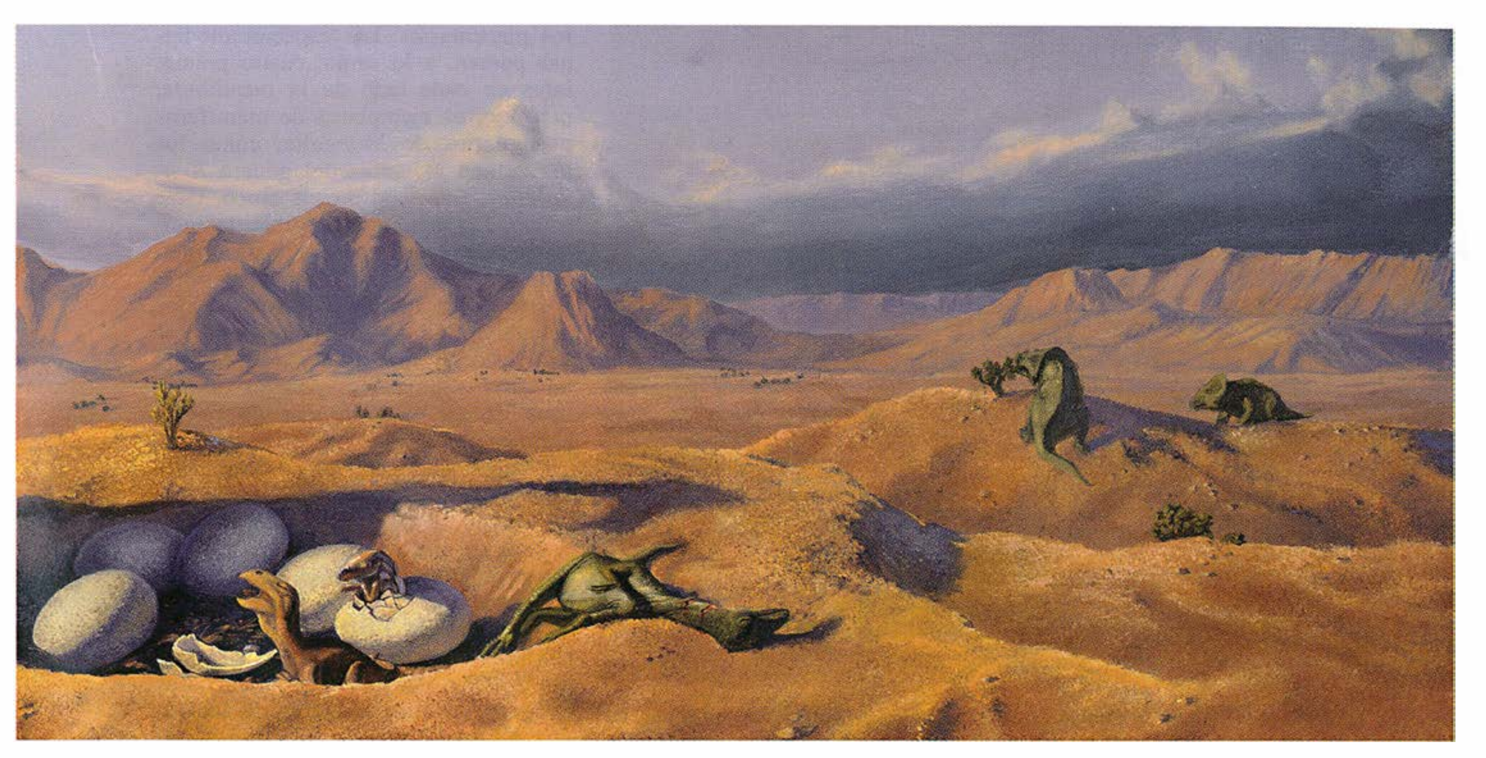
A la mañana siguiente comenzamos a explorar las colinas y los barrancos próximos al campamento. En pocas horas nos dimos cuenta de que habíamos topado con una de las concentraciones más ricas de fósiles jamás encontradas procedentes de la edad de los dinosaurios. En una cuenca de menos de dos kilómetros de ancho, hallamos una veintena de esqueletos de dinosaurios y estructuras de nidificación depositados en suaves vertientes. Entremezclados con los fósiles de dinosaurios abundaban vertebrados más pequeños —lagartos y mamíferos— que fueron también elementos clave del paleoecosistema cretácico.

La denominación local de yacimiento tan próspero es Ukhaa Tolgod ("Colinas pardas"). Este anfiteatro natural contenía un centenar de esqueletos de dinosaurios fácilmente visibles, muchos de ellos en su posición original. A lo largo de las dos últimas campañas hemos ido seleccionando los mejores ejemplares. Hay, entre ellos, 25 esqueletos de dinosaurios terópodos. Se trata de un grupo de ágiles carnívoros cuyas formas varían desde los gigantescos *Tyrannosaurus* y *Allosaurus*, hasta los ovirraptosaurios, pequeñas criaturas avianas, pasando por dromeosaurios corredores muy veloces, así *Velociraptor*. Reunimos también una valiosa e insólita colección de pequeños vertebrados: más de 200 cráneos de mamíferos —muchos de ellos con sus esqueletos poscraneales asociados— y un número incluso mayor de cráneos y esqueletos de lagartos.

La diversidad de nuestros ejemplares muestra sin ambages que el florecimiento de la vida terrestre durante el Cretácico en Asia Central no se limitó a los dinosaurios. En el Gobi de 80 millones de años atrás medraba una extensa variedad de lagartos, crocodilios y mamíferos. Hemos hallado ejemplares representantes de más de 30 especies de lagartos; algunos,



3. CRANEO DE UN OVIRRAPTORIDO ADULTO hallado en Ukhaa Tolgod, en el Gobi occidental. Esta familia de dinosaurios semejante a las aves guarda un estrecho parecido con los avestruces modernos. Algunos ovirraptóridos (quizá los de un sexo) desarrollaron una prominente cresta ósea tras alcanzar la madurez.



familia que *Velociraptor*; los intrusos podrían haberse acercado al nido para comerse los huevos, podrían haber servido de alimento para las crías del ovirraptórido o incluso podrían haberse incubado allí arteramente.

en un estado óptimo de conservación, nos muestran caracteres anatómicos que ofrecen pistas sobre las relaciones de parentesco entre sus principales familias.

Probablemente el caso más espectacular sea el de *Estesia*. Cierta mañana de 1990, durante nuestra búsqueda, topamos con un cráneo perfecto de unos 20 centímetros de longitud y dientes afilados como cuchillos; estaba medio incrustado en una plancha vertical de arenisca, a modo de bajorrelieve. De momento lo atribuimos a un pequeño dinosaurio carnívoro, pero un examen posterior determinó su pertenencia a un nuevo tipo de lagarto predador de gran tamaño, muy semejante al actual dragón de Komodo. Le pusimos ese nombre a la nueva especie en honor de Richard Estes.

Estesia es un animal muy primitivo y, como tal, de interés crucial para diseñar el dendrograma de los lagartos varanoideos (el grupo que incluye al de Komodo). El cráneo presenta una serie de canales excepcionales en la base de los dientes que sugieren que *Estesia* inyectaba veneno a sus presas. Esta arma letal no es común entre los lagartos varanoideos actuales, pero aparece en el monstruo de Gila (*Heloderm*a *suspectum*) del suroeste de Estados Unidos y norte de México.

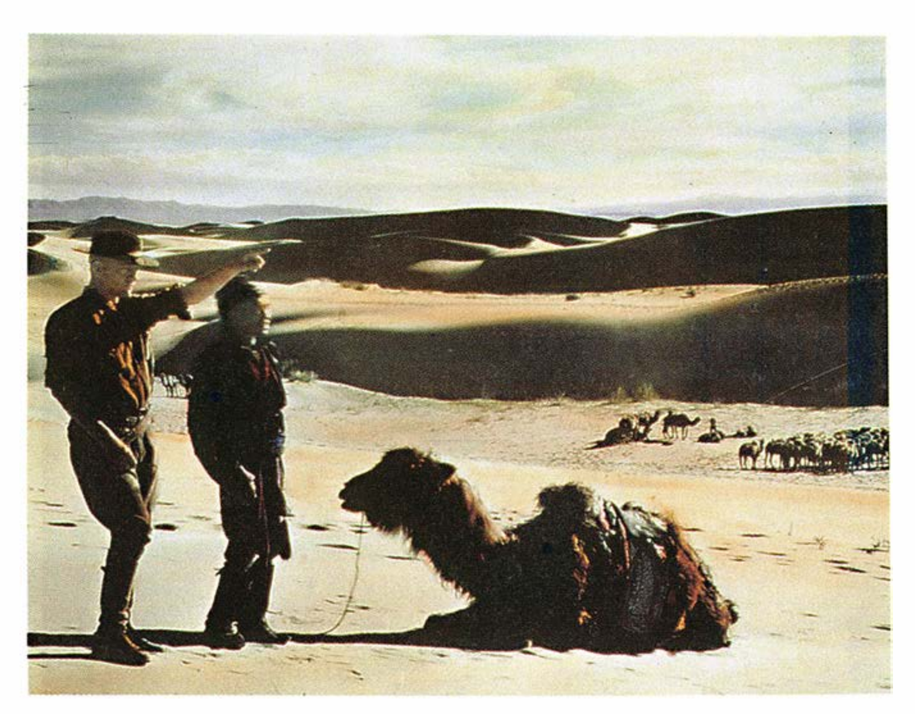
Fuimos encontrando luego fragmentos de *Estesia* en otros lugares donde abundan los restos de lagartos de menor tamaño, mamíferos diminutos y cáscaras de huevos de dinosaurios. Los varanoideos actuales se caracterizan por su apetito insaciable y variado. Es probable que *Estesia* se alimentase de vertebrados de menor talla, pequeños dinosaurios y posiblemente de huevos de dinosaurios.

Aunque el Gobi cretácico estaba seco en su mayor parte, debió de abundar el agua en algunos lugares y en ciertas épocas, por lo menos. Descubrimos, de forma esporádica, fósiles de tortugas, generalmente asociadas a hábitats acuáticos. (En formaciones rocosas del Cretácico de Norteamérica abundan caparazones de tortugas, esqueletos y fragmentos de huesos, precisamente allí donde la mayoría de las pruebas sugieren la presencia de charcas, arroyos, ciénagas y deltas.) Al oeste del valle Nemegt, hay una zona de tierras cromáticas afectadas por la erosión con una pequeña depresión del tamaño de una piscina, que guardaba caparazones y restos esqueléticos de más de 50 individuos pertenecientes a dos géneros de tortugas.

En la cata de laderas y hondona-



4. HUEVO DE OVIRRAPTORIDO (*izquierda*) con un embrión en su interior conservado en un estado casi perfecto. El cráneo (*derecha*) de un dromeosaurio juvenil (la familia de dinosaurios carnívoros que incluye a *Velociraptor*) fue desenterrado en el mismo nido; no está claro cómo llegó el intruso.



5. ROY CHAPMAN ANDREWS dirigió en 1922 la primera expedición en busca de fósiles en el desierto de Gobi. El grupo se perdió en varias ocasiones; en una de ellas descubrieron Flaming Cliffs.

das pueden pasarnos por alto algunos de los tesoros más excepcionales del Cretácico del Gobi: cráneos y esqueletos diminutos de mamíferos. Estos fósiles representan los precursores de la gran radiación de mamíferos que siguió a la extinción de los dinosaurios a finales del Mesozoico.

La mayor parte de la información científica acerca de estos primeros mamíferos proviene de los fósiles de Norteamérica, que en su mayor parte son fragmentos de mandíbulas y dientes sueltos. No existen cráneos completos de estos mamíferos cretácicos en Norteamérica. Por tanto, el conjunto del material del Gobi, incluidos nuestros hallazgos y los recogidos por las primeras expediciones, representa sin duda alguna la colección de referencia mundial de mamíferos del Cretácico tardío.

Un pequeño conjunto recuperado en Ukhaa Tolgod en 1994 contenía seis mamíferos placentarios similares a las musarañas, de algunos centímetros de longitud. Asombrosamente, se trata de cráneos fósiles completos, unidos a sus esqueletos poscraneales; dichos huesecillos suelen ser muy vulnerables a la desarticulación y a la rotura. Probablemente estas pequeñas criaturas quedaron enterradas al poco de morir y así se preservaron.

Hemos encontrado dos grupos principales de mamíferos. En primer lugar, los multituberculados. Forman un grupo singular de animales con incisivos frontales largos y molares que presentan protuberancias (tubérculos) en las coronas. Los multituberculados del Cretácico de Mongolia constituyen, con mucho, la mejor acumulación de material esquelético para estudiar las relaciones de parentesco entre éstos y otros linajes de mamíferos.

Podemos ver, en los multituberculados, los roedores de su tiempo, si bien sólo remotamente están relacionados con los grupos de mamíferos modernos. Sus adaptaciones típicas de roedores constituyen casos de convergencias evolutivas con las ratas, los ratones y las ardillas actuales. Los multituberculados prosperaron durante los primeros millones de años de la Era Terciaria, tras la extinción de los dinosaurios. Su número comenzó luego a caer y desaparecieron, siendo reemplazados por grupos más recientes de hábitats similares.

El segundo grupo lo forman los terios, antepasados de los marsupiales y de los modernos mamíferos placentarios (una categoría que se extiende desde las ballenas y los murciélagos hasta los seres humanos). Este primer grupo de terios lo integraban media docena de formas de tipo musaraña, cuyos caracteres ofrecen indicios acerca de los orígenes de miembros posteriores del grupo. En este sentido, los fósiles del género *Deltatheridium* parecen estar a caballo entre los marsupiales y los placentarios.

Otras especies apuntan hacia una edad más primitiva para los mamíferos placentarios. Las especies modernas poseen, a lo sumo, cuatro premolares en cada lado de la mandíbula, pero ciertos ejemplares de mamíferos placentarios de Mongolia, como los individuos juveniles del género *Kennalestes*, tienen al menos cinco. Otro grupo, *Zalambdalestes*, presenta incisivos de conejo o roedor y un esqueleto adaptado a la carrera y al salto, a semejanza también de los conejos actuales. Los paleontólogos no acaban de decidir si *Zalambdalestes* fue un antepasado de los conejos o si se trata de un ejemplo más de evolución convergente.

Contamos, entre las recompensas más apreciadas de nuestros trabajos de campo, con la extracción de un cráneo de *Zalambdalestes*, conservado en óptimas condiciones. En colaboración con Timothy Rowe, de la Universidad de Texas, le sacamos tomografías axiales computerizadas con un escáner de alta resolución. Las imágenes tridimensionales de los rayos X nos permitieron reconstruir la trayectoria de las arterias, las venas e incluso de los nervios. Tales imágenes confirman una vieja hipótesis de Kielan-Jaworowska: las arterias carótidas, las principales vías que abastecen de sangre al cerebro y los ojos, se introducen en el cráneo por la línea media, y no por los laterales según lo habitual en la mayoría de los mamíferos vivientes.

Los mamíferos, los lagartos y otros vertebrados desempeñan un papel crucial en la reconstrucción histórica del paisaje del Gobi y en el seguimiento de las principales líneas de evolución. Lo que no obsta para que los dinosaurios acaparen la atención del público. El Gobi cretácico es un lugar idóneo para buscar dinosaurios. Hay esqueletos enteros de *Tarbosaurus*, un terrible carnívoro emparentado con el *Tyrannosaurus* de Norteamérica, saurópodos gigantes, dinosaurios de pico de pato, ankylosaurios armados, dinosaurios ceratopsios con ornamentaciones craneanas (así *Protoceratops*) y un magnífico conjunto de carnívoros de menor tamaño. Los ovirraptóridos semejantes a las aves y los dromeosaurios (*Velociraptor*, por ejemplo) están mejor representados en las rocas estratificadas del Gobi que en ningún otro lugar del mundo.

Motivo de controversia, tales fósiles han servido también para establecer conclusiones definitivas. Con frecuencia se representa a *Velociraptor* cazando en manadas, a la manera de los perros salvajes africanos, pero no existen pruebas concluyentes sobre su capacidad real de desplegar ese com-

portamiento cooperativo. Sí trasciende la mera especulación su preferencia por la caza de *Protoceratops*. En las postrimerías de los años sesenta y en Tugrugeen, escarpe de arenisca blanquecina a 80 kilómetros al oeste de Flaming Cliffs, un grupo polaco-mongol de paleontólogos extrajo una de las más extraordinarias parejas de ejemplares de la historia de la disciplina. Se trataba de esqueletos casi completos —un *Protoceratops* y un *Velociraptor*—, que aparecieron entrelazados en un abrazo mortal. *Velociraptor* ase enérgicamente la cabeza de *Protoceratops* con sus miembros anteriores y clava profundamente las garras asesinas de sus extremidades posteriores en los costados de su presa. Los "dinosaurios luchadores", que pudieron haber encontrado su muerte en cualquier tormenta de arena del desierto, constituye una escena estelar del Museo de Historia Natural de Ulan Bator.

De los esqueletos de *Velociraptor* no sólo nos fascina la imagen que transmiten de terror, inteligencia, velocidad y potencia mortífera; nos ofrecen, asimismo, información sobre la conexión evolutiva entre dinosaurios y aves. *Velociraptor* y sus parientes poseen muchos caracteres típicamente avianos, incluidos la caja ósea que recubre el cerebro y el diseño de los miembros elongados y de los dedos. Cierto esqueleto casi entero de *Velociraptor*, que fue desenterrado en 1991 en Tugrugeen, posee el cráneo más completo; los pormenores anatómicos de la caja craneana revelan una sorprendente similaridad con los de las aves modernas.

Un posterior descubrimiento en Tugrugeen amplió los datos acerca de la conexión propuesta entre dinosaurios y aves. En 1992, recuperamos un esqueleto delicado que era idéntico, aunque de menor tamaño, a otro encontrado por paleontólogos mongoles unos años antes. El animal, del tamaño aproximado de un pavo, posee un cuerpo extraordinariamente frágil y patas largas. Además, tiene nítidamente desarrollada la quilla del esternón. En las aves modernas, los potentes músculos pectorales que impulsan el movimiento descendente del batido de las alas se insertan en la quilla. Sin embargo, nuestra criatura posee, en vez de largos huesos en las alas, miembros anteriores gruesos y voluminosos, parecidos a los de un topo excavador. El extremo del brazo y la mano lo constituye una garra solitaria, muy larga; de ahí el nombre científico que se le otorgó, *Mononykus*, "de única garra". (La ortografía original decía *Mononychus*, término más correcto en su etimología, pero resultó que había ya una cucaracha con idéntica denominación.)

Mononykus es un ser extraño. No obstante carecer de alas, posee caracteres que sugieren una relación de parentesco con las aves modernas más estrecha que la evidenciada por la famosa ave primitiva *Archaeopteryx*. Además del esternón ensanchado, presenta un antitrocánter, una pequeña protrusión de la pelvis en la articulación de la cadera que sirve de punto de anclaje muscular, una cresta continua en el fémur para el anclaje de los músculos de los miembros y una fíbula muy acortada, el hueso más delgado de las extremidades inferiores. El examen pormenorizado de *Mononykus* apoya la idea de que esta criatura fue un pariente no volador de las aves modernas.

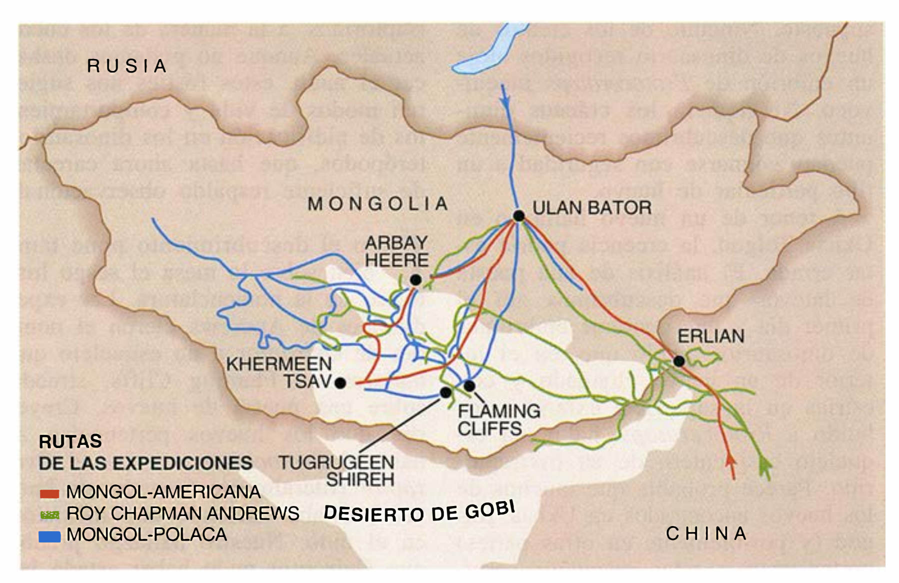
Pero esa afirmación ha recibido algunas críticas. Para algunos, *Mononykus* sería un pequeño dinosaurio cuyos rasgos avianos se deben a una evolución convergente. Los indicios, sin embargo, no abonan la convergencia. La historia de las aves está marcada por especies que han perdido la capacidad de volar (como los avestruces, los emús y los kiwis). Aunque nuestros *Mononykus* fósiles no muestran signo alguno de plumas, el que la fina caliza jurásica que sirvió de tumba a *Archaeopteryx* haya dejado impresiones de diminutas plumas es sólo obra de una milagrosa conservación. Lo mismo que la mayoría de los fósiles, *Mononykus* no se preservó en rocas tan insólitas.

Hemos descubierto restos del animal en muchos lugares. Entre los esqueletos recuperados recientemente en Ukhaa Tolgod, hay un ejemplar casi completo que posee un cráneo bien conservado. Este fósil, aunque todavía no ha salido del laboratorio de restauración, muestra indicios claros de una cabeza elongada. Lo que podemos ver difiere bastante de anteriores reconstrucciones, extrapoladas a partir de fragmentos parciales de la caja craneana. La nueva información aportada por este cráneo debería decantar el signo del debate sobre *Mononykus* y la conexión dinosaurios-aves.

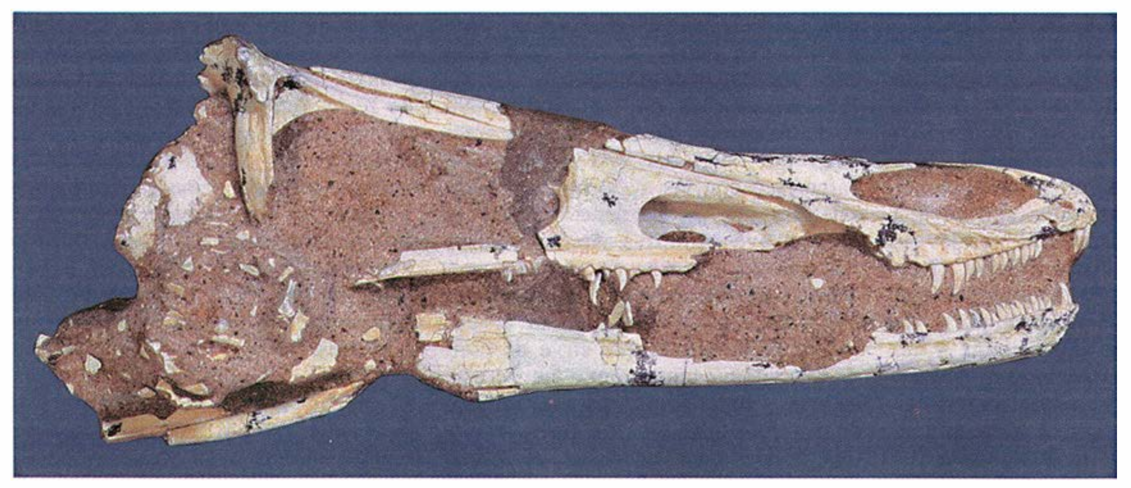
Los huevos de dinosaurios y de aves encontrados en diversos emplazamientos del desierto añaden una nueva dimensión al registro fósil. Algunos huevos contienen esqueletos embrionarios del ave *Gobipteryx*, mientras que otros conservan restos esqueléticos de un pequeño embrión de dinosaurio. En algunos lugares ciertos nidos aparecen agrupados en la ladera de una colina; de esto podemos deducir que los nidos delimitarían una colonia de dinosaurios, semejante a las colonias de aves marinas actuales.

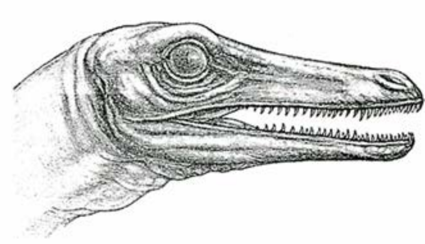
En Tugrugeen Shireh encontramos 12 esqueletos amontonados y mezclados de *Protoceratops* en una extensión no mucho mayor que el terreno nivelado que rodea un hoyo de golf. Un equipo chino-canadiense ha observado también acumulaciones de restos de *Protoceratops* en rocas cretácicas del norte de China.

La muestra de *Protoceratops* comprende diferentes estadios de crecimiento, arrojando un poco de luz sobre este aspecto desconocido de la biología de los dinosaurios. Los adultos miden unos dos metros de largo; en 1994 nuestro equipo halló algu-



6. A PESAR DE QUE LOS PALEONTOLOGOS han cartografiado un gran número de territorios ricos en fósiles, la mayoría del Gobi permanece inexplorado.





7. LOS FOSILES DE DINOSAURIOS Y MAMIFEROS del Gobi se hallan en un estado envidiable de conservación. El troodóntido recientemente descubierto (*fotografía del cráneo a escala real y boceto del animal en la izquierda*) era un pequeño carnívoro emparentado con las aves. Todavía no se ha asignado un nombre oficial. El esqueleto de un multituberculado (*en el centro y girado en la derecha*) está intacto

nos *Protoceratops* de menos de nueve centímetros de longitud. Obviamente, estos esqueletos pertenecen a los individuos más jóvenes, quizás a recién nacidos.

Pero conforme obtenemos nuevos descubrimientos más compleja se nos torna la imagen que emerge de la vida de los dinosaurios. Puesto que *Protoceratops* es el dinosaurio fósil más común de la región, los paleontólogos creyeron durante mucho tiempo que las agrupaciones de cáscaras y de huevos encontrados en Flaming Cliffs y en otras partes pertenecían a ese animal. No había, sin embargo, datos suficientes para respaldar tal supuesto. Ninguno de los cientos de huevos de dinosaurio recogidos aloja un embrión de *Protoceratops* inequívoco. Ni siquiera los cráneos diminutos que descubrimos recientemente pueden asignarse con seguridad a un tipo particular de huevo.

A tenor de un nuevo hallazgo en Ukhaa Tolgod, la creencia podría estar errada. El análisis de una puesta de huevos que descubrimos allí el primer día y que contiene embriones de dinosaurio, reveló que, en el interior de un huevo elongado y con estrías en la superficie externa, atribuido a *Protoceratops*, había un esqueleto casi entero de un ovirraptórido. Parece probable que muchos de los huevos encontrados en Ukhaa Tolgod (y posiblemente en otras partes) pertenezcan a estos pequeños carnívoros, y no al Protos herbívoro de pico córneo.

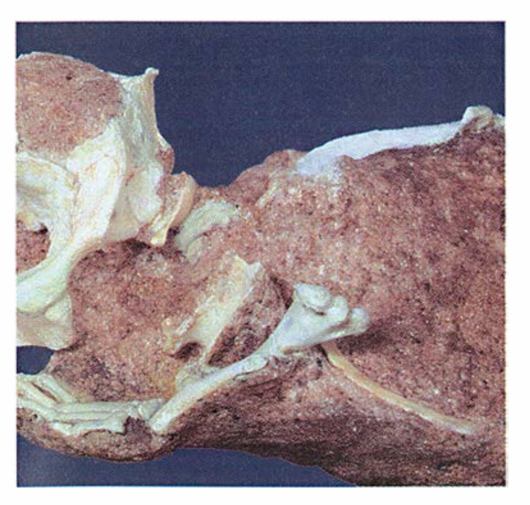
El "nido" de Ukhaa Tolgod encierra otros fósiles muy intrigantes. En el grupo de huevos yacían dos pequeños cráneos de un dromeosaurio (posiblemente de *Velociraptor*); algunos pequeños fragmentos de cáscaras de huevos del ovirraptórido aparecen asociados a sus huesos. Esta curiosa coincidencia de huevos, un embrión de un ovirraptórido y dos juveniles o recién nacidos de un dromeosaurio admite varias explicaciones plausibles.

Quizá los jóvenes dromeosaurios, a edad temprana, estaban demostrando ya su destreza con la incursión en los nidos. O quizá la madre ovirraptórido estuviera alimentando a su prole con los dromeosaurios juveniles. Los dromeosaurios también podrían haber sido intrusos, dejando sus huevos en los nidos de los ovirraptóridos, a la manera de los cucos actuales. Aunque no podamos deshacer el nudo, estos fósiles nos sugieren modos de vida y comportamientos de nidificación en los dinosaurios terópodos, que hasta ahora carecían de suficiente respaldo observacional.

Pero el descubrimiento pone también sobre la mesa el sesgo histórico de la nomenclatura. Las expediciones de Andrews dieron el nombre de *Oviraptor* a un esqueleto que hallaron en Flaming Cliffs, situado sobre una puesta de huevos. Creyeron que los huevos pertenecían al habitual *Protoceratops* y que el *Oviraptor* (literalmente "cazador de huevos") estaba haciendo una incursión en el nido. Nuestro hallazgo prueba que *Oviraptor* pudo haber estado incubando, y no devorando, los huevos. La denominación persistirá en cumplimiento de las normas de la nomenclatura, por más que difícilmente se ajuste a las circunstancias reales evidenciadas en el primer esqueleto conocido.

Abrigos de nidificación, esqueletos de aves, dinosaurios, mamíferos y otros vertebrados forman parte de un cuadro bastante cumplido de la vida en el Gobi durante finales del Cretácico. La nuevas pruebas aportadas por las expediciones conjuntas de la Academia de Mongolia y el Museo Americano se han recabado en el rastreo de miles de kilómetros sobre una amplia extensión del Gobi. Al no concentrarnos en un solo sitio, o en unos pocos, durante un tiempo más prolongado, nuestra táctica, además de multiplicar las posibilidades de encontrar nuevos yacimientos de fósiles, da una idea más ajustada de la secuencia estratigráfica de las rocas, pues compara los estratos de fósiles en un área extensa. Y así, podemos determinar si el conjunto de animales y sedimentos que representan un ambiente y un intervalo de tiempo particular son generales o si están confinados a un afloramiento aislado.

Por citar un botón de muestra, los paleontólogos han venido aceptando que la comunidad de fósiles de la formación Djadokhta (un yacimiento de areniscas rojas brillantes que dieron el nombre a Flaming Cliffs en el Gobi central) era un poco más antigua que la formación Barun Goyot (cuyo nombre procede de un antiguo poblado del valle Nemegt), al oeste de Nemegt. Sin embargo, nuestros descubrimientos en Ukhaa Tolgod y el estudio en extensión sugieren que las dos formaciones poseen faunas





casi en su totalidad, a pesar de que algunos de sus huesos son apenas medio milímetro de grueso; el cráneo tiene unos 2,5 cm de largo. Los multituberculados (*boceto de la derecha*), que se caracterizaban por poseer protuberancias (tubérculos) en las coronas de sus dientes, fueron pequeños mamíferos a los que se les atribuyen hábitats típicos de roedores actuales, como las ardillas y los ratones.



contemporáneas e idénticas. Encontramos ejemplares de esta comunidad en los espléndidos lechos rojos y bermellones de Khermeen Tsav, una zona aislada en el árido desierto al oeste de la región de Nemegt.

En Khugene Tsavkhlant, zona próxima a la vía férrea oriental, hemos encontrado también fósiles de la comunidad de Djadokhta, incluido el famoso *Protoceratops*. Tales hallazgos encierran un interés añadido: las areniscas del lugar parecen ser resultado de la acción de arroyos o ríos, una situación más típica de Norteamérica que del Gobi. De todo ello va emergiendo con creciente claridad que la comunidad animal a la que años atrás se la confinó a Flaming Cliffs podría haber ocupado en realidad diversidad hábitats.

No obstante, la gran separación geográfica existente entre muchos yacimientos constituye un obstáculo para comparar sus comunidades fósiles. Además, las secuencias rocosas del Gobi son sedimentarias, sin señal alguna de rocas volcánicas; no se puede, pues, determinar la edad de estos estratos mediante el análisis de las proporciones de sus isótopos radiactivos. Para datarlos hay que apoyarse en la similaridad de sus vertebrados con otras faunas de otros continentes y en las correlaciones de invertebrados fósiles de rocas marinas cretácicas en Asia oriental y central.

Hemos muestreado una secuencia de rocas representativas con la esperanza de obtener señales paleomagnéticas, aunque sin resultados todavía. Estas señales marcan la orientación del campo magnético terrestre en el momento en que se depositaron las rocas y sus minerales. Después, estas señales paleomagnéticas "congeladas" se pueden contrastar con la cronología de inversiones del campo magnético de la Tierra. Los datos paleomagnéticos, por consiguiente, proporcionarían una fuente de información independiente para estimar la edad de las rocas del Gobi.

Y un rasgo paradójico más: diríase que las rocas del Gobi han perdido los estratos que respondan al límite Cretácico-Terciario (K-T), momento que coincide con la extinción de los dinosaurios. Pese a la riqueza sobrada de faunas de mamíferos del Terciario temprano, parece existir un intervalo, de varios millones de años, entre éstas y las faunas de dinosaurios de finales del Cretácico. Cualquiera que fuera el cataclismo que acabó con los dinosaurios (y muchas otras especies entonces sobre la Tierra), su huella se ha borrado en Asia Central. Si se encontrara una secuencia entera en algún punto del desierto inmenso, sería de enorme valor para nuestro conocimiento sobre la extinción de los dinosaurios y la ulterior radiación de los mamíferos.

No es un simple deseo utópico el llegar a descubrir en el Gobi la transición K-T. La navegación por satélite ha transformado de raíz nuestro método de trabajo. Nos permite, por ejemplo, trazar la localización precisa de los yacimientos de fósiles y las rutas para acceder a ellos. Nos hemos servido de las imágenes de los satélites *LANDSAT* y *SPOT* como herramienta de prospección. Después de regresar de Ukhaa Tolgod en 1993, Evan Smith realzó en el ordenador las bandas espectrales del rojo y el marrón de imágenes tomadas por satélites con la superposición de colores de fotografías de las rocas. El resultado es un mapa que muestra con una alta precisión la extensión y el perfil de los estratos portadores de fósiles.

En la campaña de 1994, estas imágenes constituían ya nuestra guía de campo; nos orientábamos hacia la latitud y longitud que marcaban los grupos de píxeles rojos. Algunos de estos objetivos resultaron muy prolíficos. Gracias a la combinación de satélites y ordenadores disponemos de un atlas paleontológico muy útil de una región carente de mapas topográficos o geológicos.

Cuando nosotros vimos los acantilados de Flaming Cliffs en 1990, allí estaban tal como Andrews los había descrito: impresionantes, de un rojo destellante y repletos de fósiles.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EARLY RELATIVES OF FLOPSY, MOPSY, AND COTTONTAIL. Malcolm C. McKenna en *Natural History*, vol. 103, n.º 4, páginas 56-58; abril 1994.

A POCKETFUL OF FOSSILS. Michael J. Novacek en *Natural History*, vol. 103, n.º 4, páginas 40-43; abril 1994.

SKELETAL MORPHOLOGY OF *MONONYKUS OLECRANUS* (THEROPODA: AVIALAE) FROM THE LATE CRETACEOUS OF MONGOLIA. Perle Altangarel *et al.* en *American Museum Novitates*, n.º 3105; 24 de junio, 1994.

Bases de la tipicidad de los vinos

Los nuevos métodos de multiplicación in vitro *de la vid ofrecen posibilidades de selección de cepas y variedades sumamente interesantes. Hay que procurar, sin embargo, que no se pierda la tipicidad de los vinos*

Roger Bessis, Noël Leneuf y Jean-Claude Fournioux

La evaluación de los vinos de regiones afamadas, la clasificación consiguiente que de ellos ha resultado en cada zona y las descripciones sensoriales de los caldos han ido definiendo progresivamente su nivel de calidad y su tipicidad, noción esta última relacionada con la variedad de uva y el entorno físico de la cepa. Si el nivel de calidad fluctúa en función de los azares climáticos y de las condiciones de vinificación, la tipicidad de los vinos viene determinada por la variedad de uva y terreno de viña.

La influencia del terreno sólo se percibe cuando el vino procede de cepas sembradas en parcelas cuyo subsuelo, suelo y clima son perfectamente homogéneos. Por contra, la mezcla de cosechas provenientes de superficies heterogéneas y las vinificaciones globales (las que suelen realizarse en bodegas en régimen de cooperativa) difuminan las características propias del terreno y originan productos cuya tipicidad depende de una manera más específica de la variedad de uva.

El vino resulta, pues, de una serie de mecanismos biológicos, importantes y estables, reconocidos en la concesión de la denominación de origen controlada, en Francia, o calificada, en España (DOC). La tipicidad de un vino debe encontrarse en la uva; ha de expresarse lo mejor posible en el vino, y no depender de las técnicas de viticultura y de vinificación. Antes de examinar los problemas que plantean las nuevas técnicas de propagación de la vid y de definición de las variedades de uva, consideremos las características generales del terreno, tomando como ejemplo los vinos de Borgoña.

ROGER BESSIS, NOËL LENEUF y JEAN-CLAUDE FOURNIOUX trabajan en el Instituto Universitario de la Vid y el Vino de Dijon.

Veinte siglos de viñedos en Borgoña han demostrado que la geología del suelo, el clima, la elección de las variedades idóneas para el entorno, la historia desde la época galorromana, la influencia de las abadías cistercienses, el interés de los duques de Borgoña y el buen hacer de sus viñadores han asegurado una viticultura de calidad, cuyo prestigio se expandió con el desarrollo de los medios de comunicación y de transporte.

Aunque los caracteres naturales de los terrenos borgoñones han evolucionado poco a lo largo del tiempo, el concepto de calidad de los vinos sí ha experimentado una profunda transformación. En el siglo XVIII, se apreciaban los de coloración débil, del tipo "ojo de perdiz", producidos sobre todo por los viñedos (*côte*) de Beaune y, especialmente, los de Pommard y de Volnay. No solían consumirse los vinos de más de un año. Habrá que esperar hasta el siglo XIX para que se entronicen el vino de crianza y los vinos con año de cosecha (o vinos *millésimés* en Francia); aparece también una primera diferenciación importante en la coloración de los vinos de la *côte* de Nuits y en los vinos de la *côte* de Beaune: de los primeros se resaltaba su color de "terciopelo oscuro", y de los segundos, su "color de fuego", como en Pommard. Se crea y refina un vocabulario para precisar matices de vigor, armonía o textura aterciopelada. Se presta atención al origen geográfico, viñedo particular ("cru") y año de cosecha.

La primera clasificación geográfica —y jerárquica— de los *crus* borgoñones se emprendió en 1860: los viticultores se esforzaron por conseguir, de sus mejores vinos, unos caldos estrictamente definidos y perfectamente diferenciados por el *cru* (criterio espacial) y por el año de cosecha (criterio temporal). La carta de *crus* tenía por objeto salvaguardar el interés de la propiedad vitícola y dar garantías del origen del producto vendido en las transacciones vinícolas.

Durante la redacción de esta primera clasificación, no se entró en escisiones de propiedades aparentemente uniformes y de reputación indiscutible; se dio por sentado que los vinos eran mejores cuando procedían de propiedades homogéneas y poco parceladas. Pero la historia no ha procedido siempre hacia una óptima repartición: desde su parcelamiento entre numerosos propietarios, el Clos de Vougeot produce vinos finos y delicados en la zona alta del repecho y vinos más densos en la zona baja.

Un siglo después de que se realizara esta clasificación jerárquica y geográfica de los terrenos y de los vinos basada en la calidad de los productos, se han analizado los suelos y recogido las experiencias de los viticultores sobre las relaciones entre terruño y vino para delimitar las DOC. Lo que nos lleva a plantear la cuestión siguiente: ¿qué características relacionadas con la vid hemos de considerar en la clasificación de los suelos?

La calidad de un vino es el resultado de múltiples factores, que deben diferenciarse, variedad por variedad. La tipicidad del vino parece depender en gran medida del sustrato geoedafológico; el nivel de calidad dentro de cada tipo se halla especialmente ligado al clima anual.

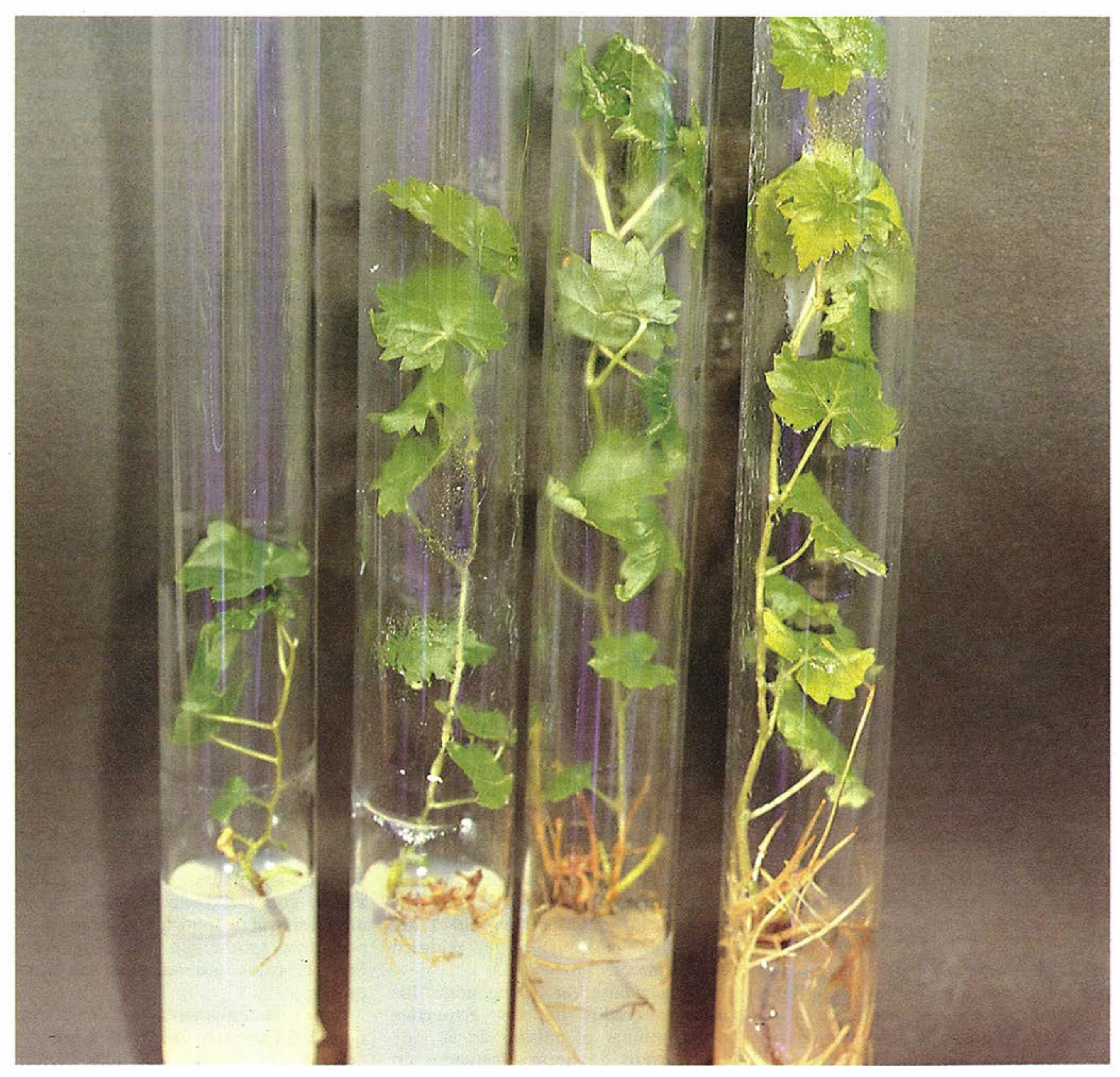
Por lo que concierne a la tipicidad, nos detendremos en la uva gamay, ejemplo muy ilustrativo. Esta uva da resultados distintos según se cultive en Beaujolais, sobre terrenos ácidos derivados de granitos, dioritas y tobas volcáncias antiguas, o en Mâconnais o la Côte d'Or, sobre terrenos calcáreos (básicos). Sin embargo, aparece una convergencia de tipo en las arcillas profundas de descalcificación en *chailles* (producidas por percolación del agua en sílice, que engendra los nódulos o "chailles") del

Mâconnais y sobre los terrenos ácidos de guijarros cuarzosos del Beaujolais. Además, en la región beaujolaise, los vinos producidos a partir de gamay difieren según que procedan de las arenas graníticas o de los guijarros porfíricos evolucionados.

La uva chardonnay da vinos secos, de crianza, en los terrenos calcáreos, mientras que las arenas graníticas y las arcillas con *chailles* originan vinos afrutados, que se comercializan jóvenes. Los vinos derivados de suelos formados sobre calizas magnésicas difieren, en buqué y aroma, de los derivados de suelos margosos. Estas diferencias en el tipo, de cuño regional, se aprecian cuando se trata de subsuelos muy dispares. Más sutiles son las diferencias cuando se comparan suelos distintos, pero asentados sobre el mismo estrato geológico, la misma topografía, la misma exposición y situados a la misma altitud: estos suelos producen vinos con calidades organolépticas diferentes, que tienen importantes repercusiones sobre su comercialización.

Queda mucho por conocer sobre la influencia del suelo en la síntesis de los azúcares, los aromas y la materia colorante. Se aduce que las concreciones de manganeso del Beaujolais, el potasio de las cloritas de Borgoña o las *chailles* son responsables de la calidad de la tipología, respectivamente, de los vinos borgoñones *moulin-à-vent*, de los producidos en los mejores viñedos de esta región y de los buenos vinos obtenidos en las laderas del Jura. Son afirmaciones no demostradas.

Estamos mejor preparados para explicar qué contribuye al nivel de calidad en el tipo; en ello interviene el suelo, sin duda, pero también los factores climáticos locales, que pueden corregirse hasta cierto punto por las influencias favorables del suelo y el subsuelo en el transcurso de años difíciles, secos o demasiado húme-



1. LA VID se multiplica hoy por cultivo *in vitro*. Se colocan fragmentos de vid en un medio estéril que protege a las plántulas de la contaminación externa y, sobre todo, de los virus. Cuando han echado varias hojas, se extraen segmentos con una yema, que se plantan en otros tubos. En un año, una sola yema engendra así hasta 10.000 individuos.



2. EVOLUCION DE LA CALIDAD DE LOS VINOS DE BORGOÑA. En el siglo XVIII, se consideraban buenos los vinos de coloración débil y jóvenes que se producían sobre todo en las laderas de Beaunne: se buscaba un color ligero, del tipo "ojo de perdiz" (*a la izquierda*). A partir del siglo XIX se desarrolla la idea de los vinos de crianza y de los vinos *millésimés*, con una diferencia de cuerpo para los vinos de Nuits (al sur de Dijon) y de Beaunne (aún más al sur); los primeros ganaron reputación por su color de "terciopelo oscuro" (*en el centro*), y los segundos por su "color de fuego" (*a la derecha*), como en Pommard.

dos. El nivel de calidad depende, sobre todo, de la evolución de las temperaturas y de la cantidad de agua disponible durante el crecimiento de la vid; y varía de unos años a otros, manifestándose en la producción de aromas, cuerpo, color y capacidad de envejecimiento del vino.

Basándose en las características de los suelos, algunos han intentado establecer en Borgoña una correlación entre el nivel de calidad, por un lado, y la pendiente topográfica, el contenido en guijarros y las proporciones de arcilla y caliza total, por otro. Se han estudiado las características de los terrenos que producen los vinos borgoñones *grand cru* (categoría extra), *premier cru* (primera categoría), *villages* y regionales (de categorías inferiores): la configuración es favorable cuando la viña está bien irrigada, con evacuación rápida del agua sobrante, y recibe una alimentación limitada durante el período de maduración (caso de los terrenos de las laderas).

En la falda de las lomas, con pendiente débil o nula, los suelos limoarcillosos profundos sin guijarros, a menudo muy húmedos a un metro o dos de profundidad, son muy productivos, pero la calidad de sus productos, en años medios y, sobre todo, lluviosos, difícilmente se aproxima a los estándares de la DOC. Por el contrario, en los años secos, producen caldos mejor elaborados, al haber adquirido mayor finura como consecuencia de una alimentación hídrica menos saturada. Las tierras "de champán", con abundantes guijarros en los mismos parajes geomorfológicos de los pies de las lomas borgoñonas, alcanzan valores DOC más firmes, gracias a la permeabilidad del suelo que contribuye a un régimen hídrico mejor.

¿Cómo conservar y regenerar los suelos alterados por las arroyadas para continuar el cultivo de la vid? Las acarreos de tierra efectuados en la concentración parcelaria de baldíos han levantado numerosas polémicas en Borgoña. Aunque justificada como manera de restituir a los suelos su capacidad vitícola, semejante práctica no debe modificar la tipicidad de la DOC: los materiales agregados tienen que proceder del mismo nivel geológico, en cantidad y calidad controladas. Asímismo, los trabajos de remodelación del relieve de las viñas, emprendidos para garantizar mejores condiciones de mecanización, habrán de respetar el entorno microclimático de los viñedos. Y deben introducirse técnicas de lucha contra la erosión de los viñedos de fuerte pendiente. Si no puede lograrse que los suelos calcáreos absorban la totalidad de ciertos aguaceros, muy destructivos en las arroyadas que provocan, hay que canalizar el agua caída a fin de evitar erosiones catastróficas.

Las aportaciones masivas de materia orgánica, que refuerzan la capacidad de absorción hídrica del suelo, no resuelven todos los problemas de las escorrentías. ¿Qué materia orgánica hemos de utilizar? Los productos de descomposición de los residuos urbanos amenazan con desnaturalizar los viñedos de DOC más que los propios acarreos con la introducción masiva de elementos principales y de oligoelementos (cadmio o plomo, por ejemplo), cuya influencia en la síntesis de los azúcares, los aromas y la materia colorante de la uva está lejos de conocerse. Y si bien es cierto que las características químicas del viñedo están estrechamente ligadas a la naturaleza del sustrato geológico, son la textura y la estructura de los suelos las que condicionan el régimen estacionario de alimentación hídrica de la vid.

Examinemos ahora la importancia de la variedad de uva y del clon, la genética, en la definición de la tipicidad de los vinos. La vid pertenece al género *Vitis*, que comprende una treintena de especies repartidas en dos grupos. El de las "euvitis" posee 38 cromosomas e incluye la especie *Vitis vinifera*; las "muscadinia" poseen 40 cromosomas. Casi todas las vides cultivadas son *Vitis vinifera*; la especie *Vitis labrusca* proporciona algunas variedades cultivadas, como el concord, y las otras especies, sobre todo americanas, proporcionan, por cruce con Vitis vinifera, híbridos utilizados en algunos países.

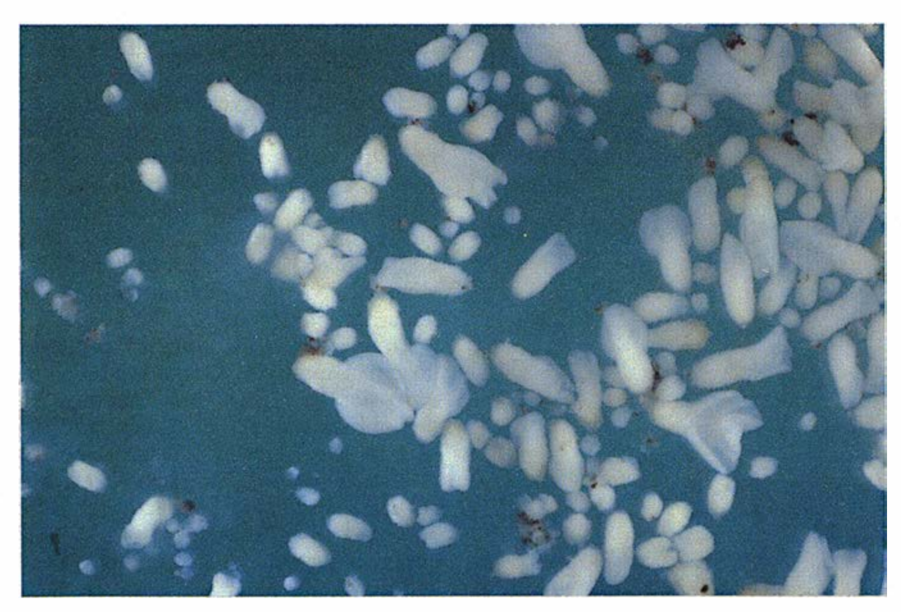
Según la reglamentación de la Comunidad Europea, todos los vinos de calidad producidos en una región sólo pueden producirse a partir de cepas puras de *Vitis vinifera*. Algunos movimientos ecologistas, funda-

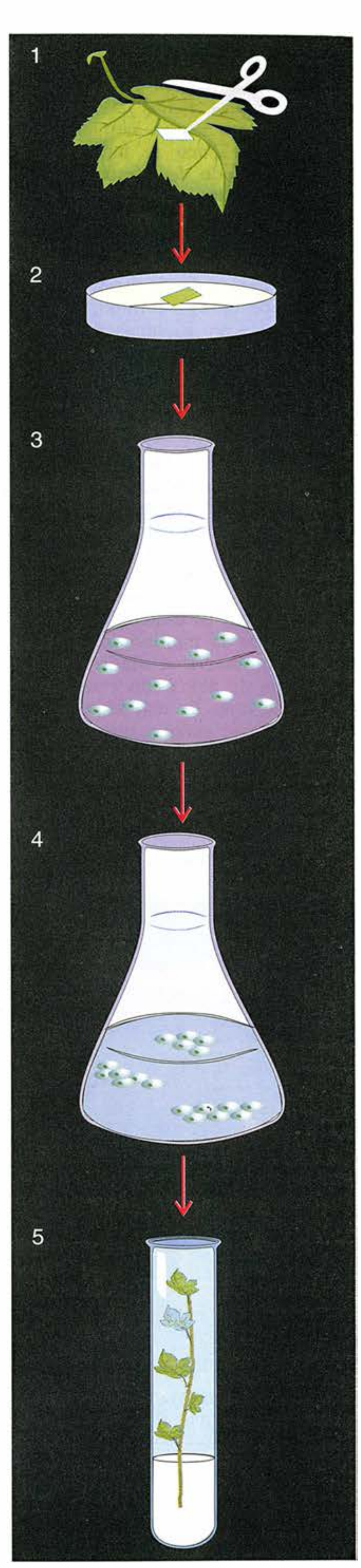
mentalmente alemanes, pretenden que se modifique esta reglamentación, ya que los híbridos, mucho más robustos que *Vitis vinifera,* necesitan muchos menos plaguicidas. En cambio, originan vinos cuya tipicidad es la característica de las cepas cruzadas, por ejemplo con *Vitis labrusca.*

Todos estos híbridos directos, que se crearon después del ataque de la filoxera, se arrancaron en 1955 en Francia porque producían vinos que habían perdido la tipicidad de su origen. El dominio de la técnica de portainjertos resistentes a la filoxera, en los cuales se inserta *Vitis vinifera* autóctona, ha permitido redescubrir los valores de los viñedos galos.

La especie *Vitis vinifera* comprende de más de 5000 cepas o variedades de cultivo diferentes. Esta diversidad obedece a que, siempre que se obtiene una planta a partir de una semilla de uva, se puede estabilizar su descendencia por multiplicación vegetativa (esqueje), creando una cepa. La vid se multiplica por cruzamiento o por esqueje. Para cruzar dos cepas, se castran las flores de una, arrancando los estambres, y se introduce el polen fecundante de la otra. En la mayoría de los casos, de las semillas formadas nacen plantas con caracteres muy diferentes de los correspondientes a las plantas parentales, que nos indica su heterocigosis. Sin embargo, si se autofecunda repetidas veces una variedad, a fin de eliminar la heterocigosis, las vides obtenidas no prosperan, su vigor disminuye en cada cruzamiento, es decir, no es posible "purificar" el genoma de nuestras vides cultivadas. Dicho de otro modo, la mezcla de genomas resultante de los cruzamientos ocurre a ciegas y produce una elevada variabilidad. Este método no permite realizar un trabajo fino en el genotipo de la planta.

La capacidad de transmisión a la generación siguiente difiere de un carácter a otro de la misma variedad. La sauvignon, pongamos por caso, se distingue por la estabilidad de su descendencia, pero es así hasta cierto punto: ¡para un conjunto de 200 caracteres genéticamente definidos, el número de combinaciones diferentes se expresa por un cifra de 94 dígitos! O lo que es lo mismo, cabe que no percibamos los cambios experimentados en la sauvignon. Esto explica que la creación de variedades por cruzamiento se limite a casos muy particulares. Puesto que no se domina su genoma y dado que, para este cultivo, "la presión de la tipicidad" es fuerte, no podemos recurrir al método de creación de variedades





3. EMBRIONES SOMATICOS DE GAMAY en medio de cultivo líquido agitados (*arriba*). La productividad de este método de propagación es considerable: a partir de un litro de suspensión celular se obtienen hasta 100.000 embriones por litro de medio de cultivo. La propagación (*a la izquierda*) comienza con la colocación de un fragmento de tejido diploide dotado de alta capacidad regenerativa (*1*) en un medio gelificado de cultivo (*2*). Los tejidos producidos se trasplantan y se dejan crecer. También se pueden separar las células e introducirlas en un medio de cultivo líquido agitado, donde forman una suspensión celular (*3*). El número de células se duplica cada dos días, obteniéndose unas 500.000 células por mililitro. A continuación se coloca cierta cantidad de células en un medio de regeneración, distinto de los precedentes, sobre todo en compuestos hormonales, con lo que se dirigen las células hacia la formación, primero de embriones somáticos (*4*) y luego de plántulas (*5*).

que tan bien opera en el trigo, el tomate o el manzano.

Mediante la técnica del esqueje, se fabrican copias fieles de la planta inicial a partir de un sarmiento con yemas. Hace poco se ha puesto a punto el método de microesqueje *in vitro*, que proporciona rendimientos muy superiores: se siembra una yema en un medio estéril que contenga todos los elementos nutritivos necesarios para tres meses de crecimiento en un tubo de ensayo cerrado; en esos tres meses, con 16 horas diarias de luz y a una temperatura de 24 ºC, cada yema forma un brote con diez yemas. Se separan las diez yemas y se replantan en tubos análogos al primero, obteniéndose así 10.000 brotes al final del año. Todas las plantas resultantes de la fragmentación de una cepa son idénticas; el desqueje, o multiplicación vegetativa, forma clones.

Sin embargo, existe en el viñedo una variabilidad intermedia entre la obtenida por la vía genética de los cruzamientos y la estabilidad que parece conferir la multiplicación vegetativa: se observa a diario que las variedades de uva están constituidas por poblaciones de individuos próximos entre sí, aunque diferentes en ciertos caracteres. Lo ideal sería poseer métodos de evaluación de estos caracteres cuya precisión nos permitiera reconocer la planta que los produce. A la vez, podrían identificar los parentales de las diversas plantas y definir su origen.

Del reconocimiento de las variedades de uva se ocupa el ampelógrafo. El reconocimiento ampelográfico se funda en el análisis de los caracteres morfológicos del brote, la hoja, el racimo y la baya. Para cada uno de estos órganos, las opciones son múltiples y exigen medidas precisas, como la del ángulo de las nerviaciones de las hojas, el formado entre las hojas y los sarmientos o las proporciones de las longitudes de las distintas nerviaciones, entre otras. El análisis ampelográfico por ordenador da todavía resultados mediocres.

¿De dónde procede la diversidad individual de las variedades de uva? Por una parte, en el pasado, varias semillas pudieron haber originado plantas lo bastante próximas como para ser consideradas, sin razón, idénticas. Ocurre así con el portainjerto SO4, que se formó a partir de varias semillas y se propagó a continuación sin que llegara a saberse qué individuos, genéticamente diferentes, procedían de qué semillas. Este es, sin duda también, el caso de numerosas variedades cuyo origen se desconoce, que procederían de semillas de vides diferentes, pero genéticamente próximas, es decir, con un origen "policlonal".

Si la multiplicación vegetativa produce, a corto plazo y en un sistema estable, individuos idénticos, descubrimos nuevas fuentes de variabilidad. Algunas afectan al genoma: no es indispensable la intervención de la reproducción sexual para que se modifiquen el patrimonio hereditario y su expresión en la planta (fenotipo); los virus —numerosos en las células de la vid— pueden aportar su lote de caracteres, que se transmiten por multiplicación vegetativa. Algunos caracteres víricos son responsables de enfermedades, pero otros no.

Las mutaciones somáticas desempeñan también su función. Al margen de la reproducción sexual, estas mutaciones pueden afectar a un carácter visible e importante, lo que induciría su eliminación, o a un carácter menos relevante, de modo que el mutante permanezca en la variedad de uva, incrementando así su variabilidad. En el transcurso de los siglos, estas mutaciones discretas han sido ciertamente numerosas. En fin, algunas bacterias del género *Agrobacterium* integran en el genoma fragmentos de ADN denominados plásmidos, que contienen diversos caracteres. La bacteria se encuentra en numerosos suelos de viñedos y ataca a veces a la vid (enfermedad de las verrugas).

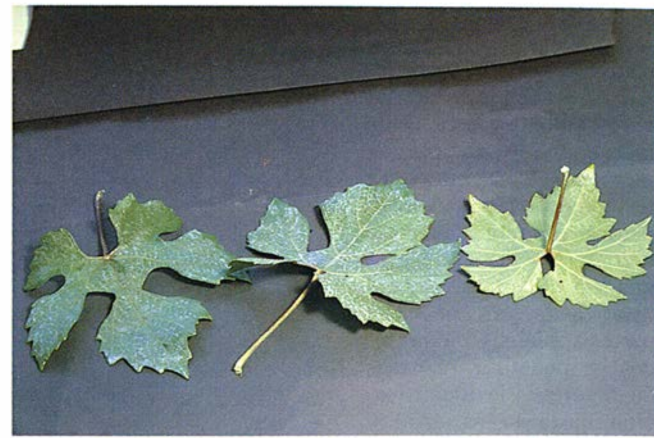
Así pues, sólo se puede asegurar la estabilidad de una variedad si se mantiene estable el sistema cultivo-multiplicación. Carecemos todavía de base suficiente para analizar este fenómeno. Sin volver a las ideas de Lyssenko, que proponía una acción directa de las condiciones externas sobre el genoma, nosotros nos inclinamos por tomar en consideración las variaciones "somáticas" para aprovecharlas en nuestro beneficio, aunque no las entendamos aún ni podamos quizá controlarlas.

La inestabilidad somática producida en la multiplicación vegetativa *in vitro* nos ha dejado sorprendidos. El descubrimiento de la variabilidad de la caña de azúcar, de la patata o de la fresa por multiplicación vegetativa no tiene el mismo impacto psicológico que en el caso de la vid, cuya "presión de tipicidad" es más elevada que la de los otros cultivos.

El comportamiento atípico de la vid bajo la acción de los factores ambientales lo describió en 1982 M. Grenan: después de un cultivo prolongado en determinadas condiciones, pequeños esquejes con morfología semejante a la de los esquejes clásicos (un trozo de sarmiento y una yema) engendran, cuando se les implanta en una viña, vides distintas de las iniciales con hojas más recortadas, sar-

4. PERFILES ENZIMATICOS de las variedades de uva pinot (*izquierda*), chardonnay (*centro*) y gamay (*derecha*). Para producir estas imágenes, se han extraído las proteínas de un fragmento de hoja y se las ha separado por electroforesis, es decir, por aplicación de un campo eléctrico en los extremos de un gel donde estaba depositada la mezcla. Después de la separación se revelan las bandas depositando sobre el gel una solución que contenga moléculas orgánicas llamadas ésteres; así, se ha revelado la presencia de las enzimas esterasas, que descomponen los ésteres. La banda BC está presente en todos los pinot. El análisis electroforético de las actividades enzimáticas permite levantar un mapa de identidad bioquímica de las variedades de uva.









5. VARIABILIDAD SOMATICA. Aparece cuando una planta se reproduce varias veces, fundamentalmente por el método de microesqueje. Algunos descendientes de un mismo individuo difieren mucho entre sí y del individuo inicial. Así, las hojas típicas del pinot clásico (*izquierda*) exprimentan una gran modificación cuando el mismo pinot se multiplica en cascada *in vitro*, luego que las plantas obtenidas se replantan en el viñedo (*derecha*). Las dos fotografías inferiores muestran el aspecto general de los dos tipos de individuos: los que se han multiplicado *in vitro* tienen sarmientos anormalmente rojos.

mientos más rojos, líneas de pelos no habituales, dientes de hoja más puntiagudos y una fertilidad modificada. Algunas modificaciones son efímeras; otras parecen más estables.

Basta, pues, multiplicar las vides en ciertas condiciones para que expresen caracteres particulares. El desconocimiento de los mecanismos responsables de estas variaciones llevó en un principio a rechazar los sistemas de propagación que originan dicha variabilidad. Pero se les puede sacar partido. Puesto que algunas modificaciones son frecuentes y regulares en todas las plantas de una variedad, cabe admitir que el genoma, es decir, su género, su especie, su variedad y su clon, se conservan y que su expresión es diferente. La modificación tendría, por un lado, caracteres considerados dependientes del genoma, que se mantienen estables en el curso de la multiplicación

vegetativa, y por otro, caracteres inestables, gobernados por la fisiología.

Para la mejora de las variedades de uva, este método, que en ningún momento hace intervenir recombinaciones genéticas, pero sí permite actuar sobre ciertos caracteres, es una vía de futuro. Deberá estar acoplado, por una parte, a análisis bioquímicos y genéticos capaces de favorecer la identificación hasta la variedad y el clon y, por otra, a ensayos clásicos de comportamiento en el viñedo.

La creación de variabilidad somática parece tanto más intensa cuanto más se aparta del esqueje clásico. El cultivo *in vitro* permite tal distanciamiento: después de un año de microesqueje, las plantas conseguidas están a cuatro "generaciones" vegetativas de la planta inicial. Además, los resultados obtenidos difieren según que se haga una reproducción por estaca clásica, a partir de madera adulta con una o varias yemas, o que se efectúe microesqueje *in vitro*.

¿Qué sucederá con otros métodos de cultivo *in vitro*? Si tampoco se utilizan esquejes con un solo ojo, sino células indiferenciadas, como las que se encuentran en la nucela (tejido diploide del óvulo) o al borde del estambre, aumenta notablemente la variabilidad somática. Estas vías de producción vegetal se dominan desde hace algunos años: las variedades de uva chardonnay, pinot y, sobre todo, gamay dan individuos bastante diferentes de la planta inicial.

Por lo general, los ampelógrafos sólo saben distinguir las variedades de uva; no los clones. Los límites de la ampelografía impiden el dominio de la calidad y de la tipicidad. Empiezan a aparecer métodos que permitirán resolver este problema, pero aún no se han aplicado en la práctica de la viticultura: algunos investigadores estudian la expresión directa del genoma (las enzimas producidas por los diversos individuos); otros se dedican a observar directamente el ADN.

Podemos ya extraer las proteínas solubles de 100 miligramos de tejido de hoja de vid separándolas por electroforesis: se deposita la mezcla en un gel entre cuyos extremos se aplica una diferencia de potencial; las proteínas migran a velocidades distintas en función de su masa molecular y de su carga eléctrica. La revelación de su actividad enzimática se consigue empleando un sustrato específico, que permite reconocer un determinado número de bandas; así, para reconocer una actividad glutamato-oxalacetato-aminotransferasa, se añade ácido alfa-cetoglutárico y se observa si la enzima transforma esta molécula en ácido glutámico. Con esta técnica, Marc Benin comparó 42 variedades de uva en 1988 y demostró que, para tres actividades enzimáticas de referencia, aparecen 39 bandas, 8 de las cuales están presentes en todas las variedades; entre las bandas variables, una se observa sólo en una única variedad de uva: la del tanato, de la cual es característica. A la inversa, la ausencia de ciertas bandas es característica de otras variedades de uva: las variedades saboyanas marsanne y rousane son las únicas que no tienen dos de todas ellas.



6. ***Vitis vinifera*****. Grabado que aparece en *****De historia stirpium***** (1542) de Leonhart Fuchs.**

Las variedades de uva próximas pueden reagruparse mediante análisis informático, encontrándose las mismas familias de variedades propuestas por la ampelografía clásica, lo que prueba a la vez la validez del método y sus límites. El análisis es complejo, y tanto más cuanto que se dirige a un mayor número de variedades de uva; un pequeño número de bandas enzimáticas permite diferenciar un número restringido de variedades de uva; para distinguir entre más variedades de uva se impone un gran número de bandas —y un tratamiento informático muy complicado. Valdría la pena realizar el mapa enzimático de las variedades de uva: constituiría la base de una ampelografía exacta.

Por último, la habilidad para regenerar las plantas completas a partir de células abre la posibilidad de propagar en todas las plantas regeneradas una modificación efectuada en el genoma de una célula inicial.

Todas las modificaciones del cultivo de la vid son interesantes siempre que preserven la tipicidad de los vinos, definida ésta por el terreno y la variedad de uva. Estos dos constituyentes de la tipicidad son complementarios e inseparables. Recordemos el dramático episodio de la plantación de los híbridos productores di-

rectos, evocado al principio del artículo. Estos híbridos, creados a raíz de la crisis filoxérica, parecían prometedores, pues resistían no sólo la filoxera, sino también la mayoría de las enfermedades de la viña: oídio, mildiu y podredumbre gris, entre otras. Eran muy fértiles y, aun después de fuertes heladas, daban cosechas completas; los vinos producidos a partir de los híbridos daban los colores clásicos..., pero tenían a menudo aromas acentuados que no respetaban la tipicidad. La erradicación de estos híbridos en 1955 marcó el mundo vitícola. Los viñadores comprobaron que su terreno, expresión ancestral de las características extraordinarias de su vino, perdía sus cualidades cuando se sustituía el encepamiento tradicional por un híbrido. Así se demostró que el mejor emplazamiento vitícola, el mejor *cru*, sólo existe a través de sus variedades de uva predilectas.

Hoy día la evolución se ha invertido. Algunos creen que la variedad de uva es el soporte esencial, incluso único, de la calidad de los vinos. Muchos siguen pensando que la tradición siempre supo asociar el terreno a la variedad de uva para sacar de esta asociación el mayor rendimiento, lo que a veces es cierto: la asociación de Borgoña y el pinot es milagrosa. Esta variedad de uva suele ser en general tan decepcionante, produciendo soluciones hidroalcohólicas insípidas, sin ácidos ni aromas (da a veces excelentes vinos en algunas regiones, como Oregón, Alsacia y algunas regiones de Alemania), que verla manifestarse en Borgoña es pura magia, tanto más notable cuanto que estas expresiones son diversas, ofreciendo una variedad infinita de matices, y que basta una nimiedad, un desplazamiento de algunos metros hacia el llano, para perderlas en su totalidad.

Sin embargo, la tradición no acertó siempre con el mejor terreno para cultivar determinada variedad. Las variedades más cultivadas en el Midi francés originan vinos a menudo mediocres: nada impedirá a la variedad cariñán tener taninos bastos, astringentes, y producir un vino duro; nada impedirá que la garnacha sea fácilmente oxidable y que la única ventaja de la aramón sea la abundancia de su cosecha. Como la consecución de buenos vinos con estas variedades es una apuesta al alcance de pocos enólogos, el viñedo del Midi hace hoy un esfuerzo considerable para cambiar estas variedades de uva y usar otras "mejoradas"; pero la creación de una tipicidad exige años, cuando no generaciones de viticultores.

Los viñadores recientemente instalados en Australia, California o Brasil promueven los vinos varietales, una vez comprobado que nunca se producirá en sus viñedos ni un vougeot ni un petrús. Es cierto que con buenas variedades y buenos enólogos se hacen buenos vinos, aunque sin esa carga emocional que proporciona la historia, la cual ha seleccionado, a veces maravillosamente, las técnicas de tratamiento de la viña, de vinificación y de envejecimiento de los vinos. Les falta también la tipicidad, que tan sólo puede conferir la asociación satisfactoria entre el terreno, la variedad de uva, las técnicas de cultivo de la vid y las de elaboración de los caldos.

Las reglas de la agricultura actual, creadora de novedades, no se aplican fácilmente a la vid. Esta es capaz de producir uva en cualquier lugar, pero la tradición ha forjado un producto de alta tipicidad asociando terreno, variedad, forma de cultivo y modo de vinificación. Este conjunto de caracteres se tiene en cuenta habitualmente en la denominación de origen de un producto. Cualquier cambio en la dosificación lleva a la obtención de otro producto, esto es, a la desaparición de la situación adquirida.

Pero la tradición sufre los embates de nuestro tiempo: elevación de los costes de producción, impacto ambiental o las imitaciones fraudulentas, por ejemplo. Para reconocer lo que debe mantenerse, en qué aspecto no se puede transigir e intervenir con inteligencia y precisión sobre el resto, deben emplearse los métodos de la biología moderna. Sólo ellos permiten mejorar la vid, responder a la expectativa de viñadores y consumidores, facilitar la vida a los viticultores y respetar la tipicidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TERROIRS ET VINS DE FRANCE. ITINÉRAIRES OENOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES. Dirigido por Charles Pomerol. Ediciones del BRGM.

QUELQUES RÉFLEXIONS À PROPOS DE MODIFICATIONS MORPHOGÉNÉTIQUES CONSÉCUTIVES À LA CULTURE *IN VITRO* CHEZ LA VIGNE (*VITIS VINIFERA L.*). S. Grenan en *Annales des sciences naturelles, botanique*, vol. 4, páginas 135-146, 1982.

CARACTÉRISATION DES CÉPAGES DE *VITIS VINIFERA L.* PAR ELECTROOPHRÈSE D'ISOENZYMES FOLIAIRES. ESSAI DE CLASSIFICATION DES VARIÉTÉS. M. Benin, J. Gasquez, A. Mafhoudi y R. Bessis en *Vitis*, vol. 27, páginas 157-172, 1988.

¿MUERE LA LETRA IMPRESA?

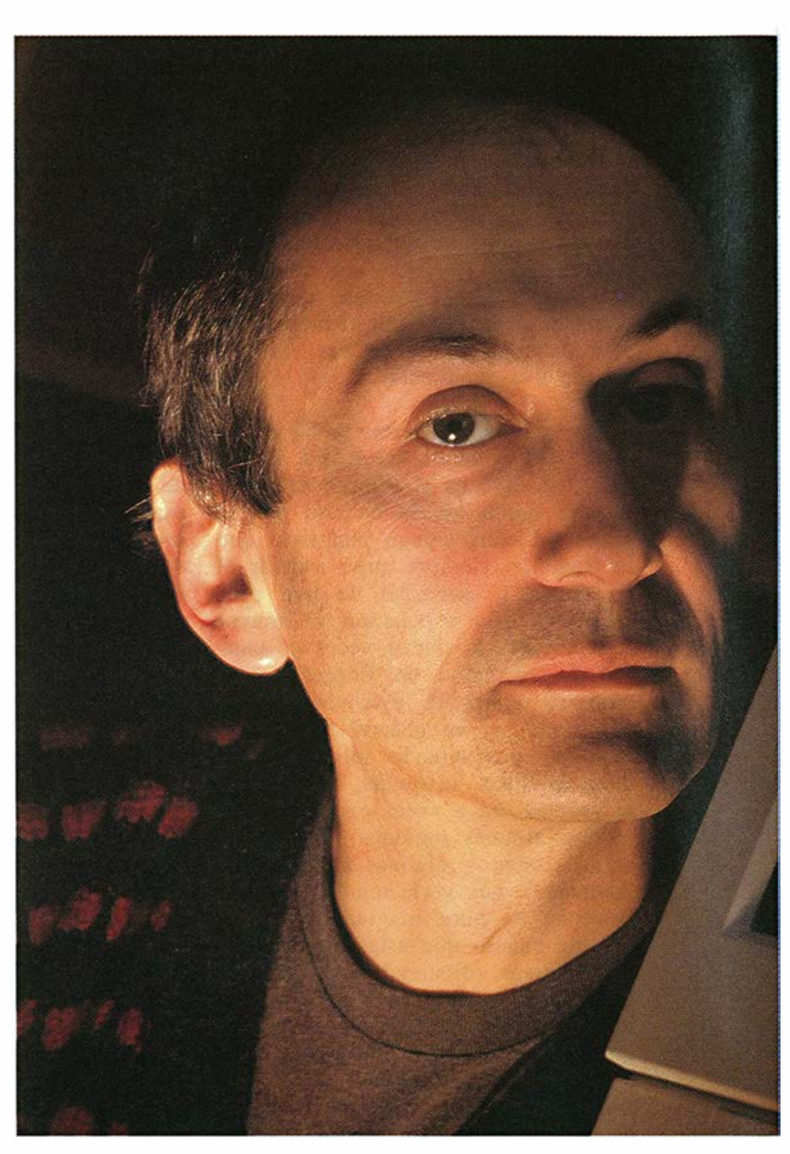
Gary Stix

Bajo una mesa situada en un rincón del despacho de Paul H. Ginsparg, en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, y cercada por rimeros de artículos científicos, una raqueta de squash, revistas atrasadas y alguna que otra lata de refresco, se encuentra una máquina que está cambiando la forma de hacer ciencia. A primera vista parece un ordenador del montón, una estación de trabajo Hewlett Packard 9000 no muy distinta de las utilizadas en cualquier laboratorio de ingeniería. Ello no impide que sean decenas de miles los científicos de todo el mundo que diariamente le prestan atención.

En esta máquina opera el fruto de un proyecto al que Ginsparg ha dedicado buena parte de su tiempo libre durante los tres últimos años. Este hombre, cuyos amores terrenales llegan hasta la teoría de cuerdas y la gravitación bidimensional (redúzcase el espacio a una dimensión, añádase gravitación y agítese), ha preparado programas gracias a los cuales otros investigadores pueden depositar en su ordenador, a través de Internet, los "inéditos", esto es, trabajos de investigación no examinados aún por los comités de selección de las revistas científicas.

Ese ordenador, conocido por la críptica dirección que tiene en Internet, "xxx.lanl.gov", se ha convertido en el noticiero diario para los teóricos de altas energías, amén de expertos de más de otras diez disciplinas, pertenecientes, sobre todo, a las ciencias físicas y matemáticas. Alrededor de unos 20.000 mensajes de correo electrónico transportan diariamente a más de 60 países los resúmenes de nuevos artículos almancenados en las bases de datos del ordenador. Los lectores de los sumarios proceden seguidamente a "echar mano" de decenas de miles de copias de los artículos completos. Como dice Steven B. Giddings, físico de la Universidad de California en Santa Bárbara, "sólo uso las revistas para los artículos anteriores a los de las bases de datos de Los Alamos".

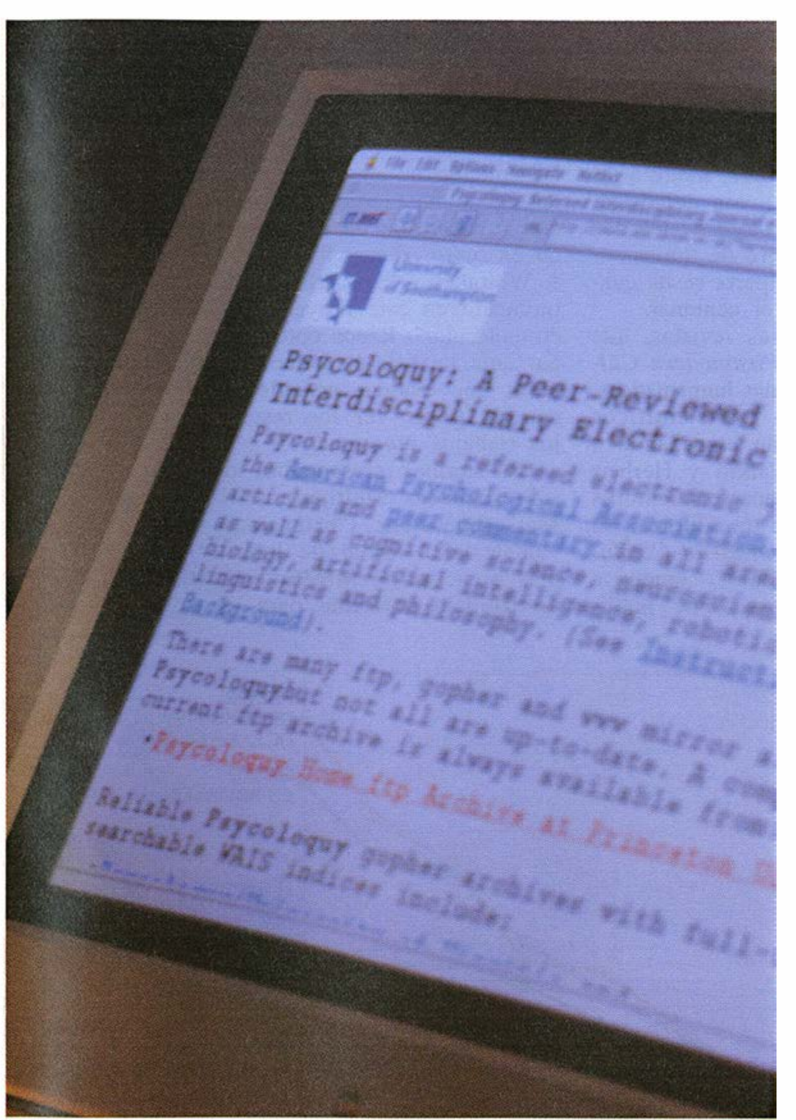
La máquina de Los Alamos no es más que una manifestación de lo que tal vez constituya un desplazamiento de primera magnitud en las formas de intercomunicación entre científicos. Internet, a la que están conectadas unas 40.000 redes informáticas, se ha convertido en la mayor pizarra del mundo.



1. STEVAN HARNAD, experto en psicología cognitiva y editor de Psycoloquy, una revista electrónica. Este profesor de la Universidad inglesa de Southamp-

Internet constituye el medio preferido para la difusión de noticias breves, habladurías y críticas, tanto serias como veleido-

Los científicos transmiten hoy informes de sus investigaciones —desde la idea germinal hasta el resultado definitivo— a través de redes electrónicas. Cabe incluso presenciar en directo experimentos en curso. Ni las editoriales ni las bibliotecas volverán a ser las de antes



ton se ha convertido en proponente de la diseminación a precios económicos de trabajos científicos y eruditos por Internet.

sas, sobre hallazgos científicos en campos que van desde la fusión fría hasta presuntas demostraciones del "último teorema de Fermat". La máquina de Los Alamos puede representar el futuro de la publicación científica. Si Ginsparg consigue canalizar la avalancha de "inéditos", filtrándolos a través de algún proceso de revisión autorizada, la revista de física tradicional, impresa en papel y encuadernada en rústica, puede que se convierta en un anacronismo.

La comunicación científica tiene cada vez menos de descripción histórica y más de registro "en directo" de la evolución de un problema de investigación; puede dejar de lado el proceso burocrático de edición, en el que los artículos aparecen meses o años después de que los autores hayan abordado ya su siguiente proyecto. "La letra impresa, aunque necesaria e importante, peca de lentitud y escasa maleabilidad", opina Stevan Harnad. "El trabajo y la inspiración de un intelectual podrían alcanzar alturas mucho más elevadas si recibieran respuesta inmediata, más próxima a la velocidad del pensamiento."

Según esta óptica, programas instalados en ordenadores geográficamente dispersos podrían interconectar todo un corpus de investigación, desde la notificación vía correo electrónico de los primeros resultados hasta cualquier comentario posterior pertinente, pasando por la revisión autorizada.

Con la aparición de este fenómeno tal vez deba cambiar la definición de colaboración científica. Los comentaristas de artículos pasarán en la práctica a ser miembros de los equipos de investigación. La red abre incluso la posibilidad de una amplia participación en la actividad experimental. Investigadores de todas las ramas de una disciplina podrían ser testigos del desarrollo de un experimento y registrar sus comentarios para futuro examen por otros.

El creciente papel de Internet como medio para la difusión de los hallazgos resulta particularmente feliz a la luz de lo que puede que sea una crisis en el sistema tradicional de la edición. Al tiempo que las disciplinas científicas crecen y se escinden en subdisciplinas, cada nuevo campo de estudio requiere su propia revista especializada. Las bibliotecas se las ven y se las desean para dar cabida a esa avalancha de información.

El caudal de la información científica se está duplicando aproximadamente cada 12 años;

los rimeros de revistas pueden dejar chiquitos incluso a los monumentos nacionales. En un artículo difundido por vía electrónica, dedicado al deceso de la revista tradicional, Andrew M. Odlyzko afirmaba que casi la mitad del millón de artículos de matemáticas publicados a lo largo de toda la historia se han impreso sólo en los diez últimos años. El costo de producción de las revistas necesarias para mantener todos esos artículos repercute sobre una minúscula base de suscriptores, formada, sobre todo, por bibliotecas universitarias.

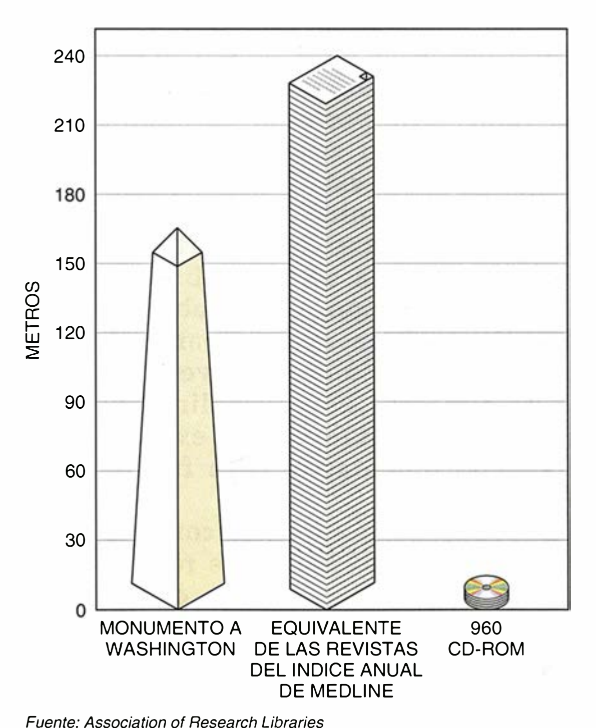
El costo y la demora se han convertido en un atolladero para la comunicación especializada. Los precios de las revistas se han duplicado con holgura desde el año académico 1985-86 hasta el 1992-93. Los incrementos porcentuales rebasaron de largo las tasas de inflación y las asignaciones a las bibliotecas. La suscripción anual a ciertas revistas puede costar ya casi tanto como un coche. Contra las protestas de profesores y doctorandos, los bibliotecarios han recortado gastos en las suscripciones. "Se está produciendo una auténtica poda", afirma el premio Nobel Joshua Lederberg, partidario acérrimo de la distribución electrónica de la bibliografía científica. "Dentro de poco, una institución adquirirá una publicación, y todos los demás dispondrán de ella por préstamo interbibliotecario."

Pero ha surgido una vía alternativa. Docentes e investigadores pueden componer y confeccionar tipográficamente sus propios artículos y distribuir una publicación periódica directamente desde los enlaces de sus instituciones con Internet, obviando así los sistemas tradicionales. La edición de 1994 del *Directory of Electronic Journals, Newsletters and Academic Discussion Lists*, publicada por la Asociación de Bibliotecas de Investigación, mencionaba 440 boletines y revistas electrónicas, frente a las 110 de la primera edición del directorio, en 1991. A lo largo de los dos últimos años, el número de títulos sometidos a revisión experta se ha cuadruplicado, y ronda el centenar.

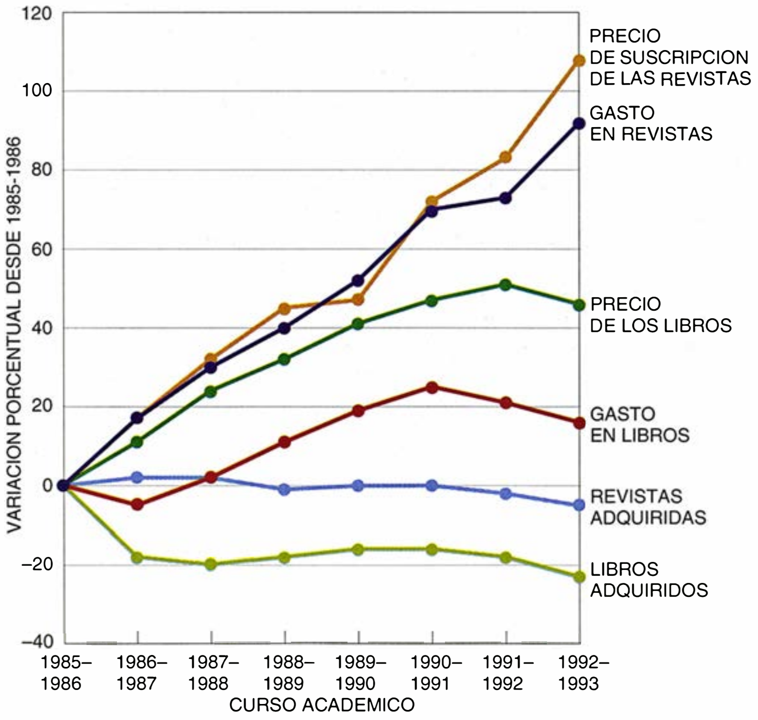
La mayoría de estas revistas, que tienen títulos como *Postmodern Culture*, se ocupan de temas humanísticos, no científicos. Pero los científicos y los ingenieros están empezando a pedir vez. Neil J. Calkin y Herbert S. Wilf decidieron hacerse miembros de esta nueva estirpe de editores. Su revista, *Electronic Journal of Combinatorics*, cuyos artículos somete a revisión por expertos, viene publicándose desde abril del año pasado, y se ha ganado el entusiasta respaldo de matemáticos prominentes. Calkin estima que, aparte de su tiempo, el proyecto consume solamente 25 megabytes de espacio de almacenamiento en disco (cuyo costo no llega a 50 dólares.)

Las publicaciones electrónicas se benefician también de un creciente número de programas de uso público que simplifican la presentación de fórmulas matemáticas, modelos químicos y otros gráficos. Tres investigadores ingleses han propuesto un conjunto de estándares que permitirían realizar, a través de Internet, la transmisión de imágenes de moléculas con tanta facilidad como se hace con un mensaje de correo electrónico en texto. Henry Rzepa, Benjamin J. Whitaker y Peter Murray-Rust han trabajado en este proyecto "telefónico-molecular". Rzepa optó por participar ante la dificultad que le suponía tener que evaluar artículos científicos sin poder ver los resultados de los trabajos presentados.

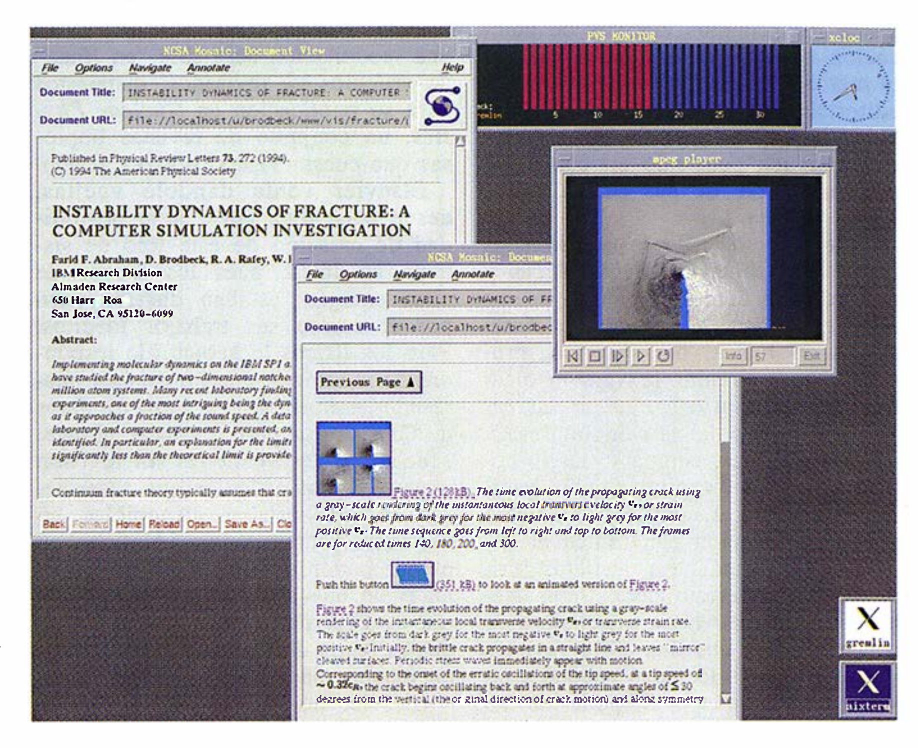
Las normas presentadas, que han sido llamadas Multipurpose Internet Mail Extensions ("extensiones polivalentes del correo de Internet") o, más brevemente, MIME, especifican un formato uniforme para el envío



2. LA TORRE DE REVISTAS contigua al Monumento a Washington muestra una pila de publicaciones mencionadas en una base de datos de bibliografía biomédica, llamada Medline, durante un solo año. Si se almacenara este material en discos CD-ROM o en bases de datos accesibles en línea, las bibliotecas podrían habérselas más fácilmente con semejante avalancha de información.



3. MENOS A MAYOR COSTE parece constituir una tendencia duradera en los gastos de suscripción de revistas y de adquisición de libros de las bibliotecas de las principales universidades. El coste de las revistas se duplicó holgadamente a lo largo de los ocho últimos cursos académicos, mientras que el número de suscripciones sufrió un retroceso. Sin embargo, las editoriales siguen lanzando más y más revistas.



4. ESTAMOS ASISTIENDO a la configuración de revistas multimedios a través de diversos proyectos individuales. Los investigadores de IBM colocaron en Internet un artículo que habían publicado en *Physical Review Letters*, al que añadieron dos simulaciones computarizadas del crecimiento de una grieta.

de datos químicos por una red. Entre los ejemplos de estas transmisiones tendríamos las coordenadas necesarias para representar una molécula, o las variables matemáticas correspondientes a su análisis espectral. Un paquete de programas de modelización química puede valerse después de una MIME para presentar, manipular e incluso rotular y anotar una molécula. "Químicos y biólogos pueden ahora intercambiarse moléculas en sentido virtual", afirma Rzepa.

Pero el "movimiento de correo electrónico" podría fracasar y quedar como el mayor chasco de la industria editorial de todos los tiempos. Todavía son pocas las revistas electrónicas, "en línea," que han alcanzado el prestigio que logra hacer que una línea de un extracto signifique la titularidad o la promoción en el puesto docente.

El tono igualitarista, el "todo vale", de Internet podría actuar en contra de los empeños tendentes a elevar la categoría de las revistas electrónicas. La Usenet, una vasta miscelánea de boletines, accesible a los millones de usuarios de la red, constituye la antítesis de la selectividad practicada por los editores y los comités de selección de las revistas técnicas. En la Usenet, las comunicaciones, irrestrictas, van desde experimentos genéticos realizados por extraterrestres llegados en ovnis hasta debates profundos sobre los avances en robótica o en terapia genética. No faltan entre los intelectuales quienes teman que el puro volumen de la literatura y la creciente incapacidad para distinguir el trigo de la paja en lo publicado pueda desembocar en una pérdida generalizada de calidad. "Habrá mucha más basura de la que tenemos hoy", opina Frank S. Quinn.

Estas ideas podrían cambiar de imponerse un sistema riguroso de control de calidad. Tal vez el partidario más locuaz de que la red constituya un vehículo de comunicación académica sea Stevan Harnad. A Harnad se le conoce, sobre todo, por haber sido fundador y editor durante más de quince años de *Behavioral and Brain Sciences* (revista cuyo acrónimo, *BBS*, resulta bastante apropiado, por ser el mismo que sirve para designar los tablones de anuncios electrónicos: "bulletin-board system", en inglés).

En *BBS*, los artículos son examinados por unos cinco expertos pertenecientes por lo menos a tres disciplinas distintas, entre las que pueden contarse etología, informática, lingüística, filosofía, robótica o visión artificial. Si el artículo se considera idóneo, puede ser enviado hasta unos cien especialistas, para comentario crítico. El artículo original puede ir acompañado de hasta treinta de dichos comentarios.

Harnad descubrió las posibilidades del discurso electrónico erudito a mediados del decenio pasado, en un boletín electrónico de Usenet dedicado a la inteligencia artificial. Observó que el frenesí de actividad en este "tablero de graffiti planetarios" espoleaba sus propias reflexiones sobre las causas de que la mente no se comporte como un ordenador. "Me pregunté qué ocurriría si las personas con quienes hablaba hubiesen sido verdaderos intelectuales."

Hace cinco años, Harnad puso en marcha *Psycoloquy*, revista electrónica idéntica a *BBS* en cuanto a los temas de que se ocupa y a sus prácticas editoriales. Esta revista es gratuita; Harnad la mantiene con una subvención de 15.000 dólares a cargo de la Asociación Americana de Psicología, con los que atiende los gastos de edición y administración. La revista, enviada a ordenadores repartidos por todo el mundo, está disponible incluso en la Usenet.

El verano pasado, Harnad envió "una propuesta subversiva" a una lista de correo electrónico; en ella sugería la conveniencia de que autores e instituciones tratasen de minar el actual sistema de publicación, echando al correo electrónico los "inéditos". Tal acción provocaría en el mundo académico el mismo tipo de emigración en masa al medio electrónico que se ha producido ya entre los físicos de altas energías.

Más o menos simultáneamente, Harnad, Lederberg y otros se reunieron con un funcionario de la UNESCO para debatir la distribución de información biomédica a los países en desarrollo. Propusieron que la Organización corriera con los gastos de publicación electrónica, de bajo costo, de artículos científicos. "Me parece que eso pondrá la pelota en juego", opina Lederberg. "Si lográsemos que unas cuantas instituciones hicieran esto, otras pensarían en subirse al mismo tren."

Las editoriales están percibiendo la presión para lanzarse al ruedo electrónico. Son muchos, sin embargo, quienes tienen que determinar todavía las formas de suavizar la transición. La distribución simultánea en forma impresa y electrónica podría, en todo caso, provocar la subida de las tasas de suscripción. Las ilustraciones, los gráficos y las fórmulas matemáticas hacen que las publicaciones científicas sean más difíciles de manejar que la provisión de bases de datos exclusivamente textuales. Transcurrido más de un decenio

desde los primeros ensayos de colocación de periódicos electrónicos en el mercado, son muchas las empresas editoriales que se preparan para trasladarse al nuevo medio. "Las editoriales siguen pensando en cómo podrán resarcirse de sus costos", dice David Rogers.

Tanto las sociedades profesionales como las publicaciones científicas y técnicas han comenzado a trazar sus estrategias iniciales. La Sociedad Americana de Física, por ejemplo, proyecta hacer circular la versión electrónica de *Physical Review Letters* juntamente con la versión impresa.

Reed Elsevier, compañía anglo-holandesa con un capital de 4300 millones de dólares, apostó fuertemente por la publicación electrónica al adquirir Lexis, una base de datos jurídicos, y el servicio de noticias Nexis. Pero dista todavía muchísimo de haber logrado que sus 1100 revistas y publicaciones técnicas puedan consultarse "en línea". Dispone de un programa experimental para proporcionar a nueve universidades ficheros imagen de las 43 revistas que dedica a la ciencia de los materiales. Este año realizará ensayos mercadotécnicos de todas sus revistas en un formato electrónico, pero todavía carece de planes definitivos acerca de cuándo quedará disponible la serie completa de sus publicaciones en forma de bases de datos consultables.

Elsevier Science, la división de publicaciones de revistas científicas, desveló en enero del año pasado su primera revista electrónica. El acontecimiento supuso un homenaje indirecto al trabajo de Paul Ginsparg. *Nuclear Physics Electronic* (*NPE*) es una recopilación accesible "en línea" de artículos ya revisados, dispuestos para su publicación en *Nuclear Physics*, un conjunto de revistas impresas que cuesta 12.000 dólares al año.

Elsevier venía dándole vueltas, desde hace diez años, a la posibilidad de creación de este tipo de sistema en línea, pues los físicos de altas energías estaban distribuyendo por el correo sus trabajos inéditos. Pero los físicos le habían ido respondiendo a Elsevier que no estaban interesados —hasta que la base de datos de Ginsparg empezó a cobrar adeptos. Muchas de las versiones sin revisión experta de los artículos que aparecieron en *NPE* estaban disponibles, en versiones prácticamente idénticas, en el ordenador de Los Alamos mucho antes de que aparecieran en el sistema de Elsevier. El abanico de temas de las bases de datos de Los Alamos es mucho más amplio.

Elsevier no ha exigido todavía la retirada de sus artículos de las bases de datos de Los Alamos una vez aparecidos con copyright en *NPE*. Ginsparg, por su parte, puede acabar necesitando la ayuda de los principales editores tradicionales. De hecho, se reunió a mediados de octubre con funcionarios de la Sociedad Americana de Física para discutir cómo podría instituirse un sistema de revisión para sus bases de datos. De todos modos, aunque Ginsparg acabe por tener que dar carpetazo al asunto, la publicación de revistas podría cambiar todavía: los costos podrían ser acusadamente menores que los de las revistas en papel; las revisiones podrían efectuarse más rápidamente y la base de colaboradores para la evaluación de originales, ser más amplia.

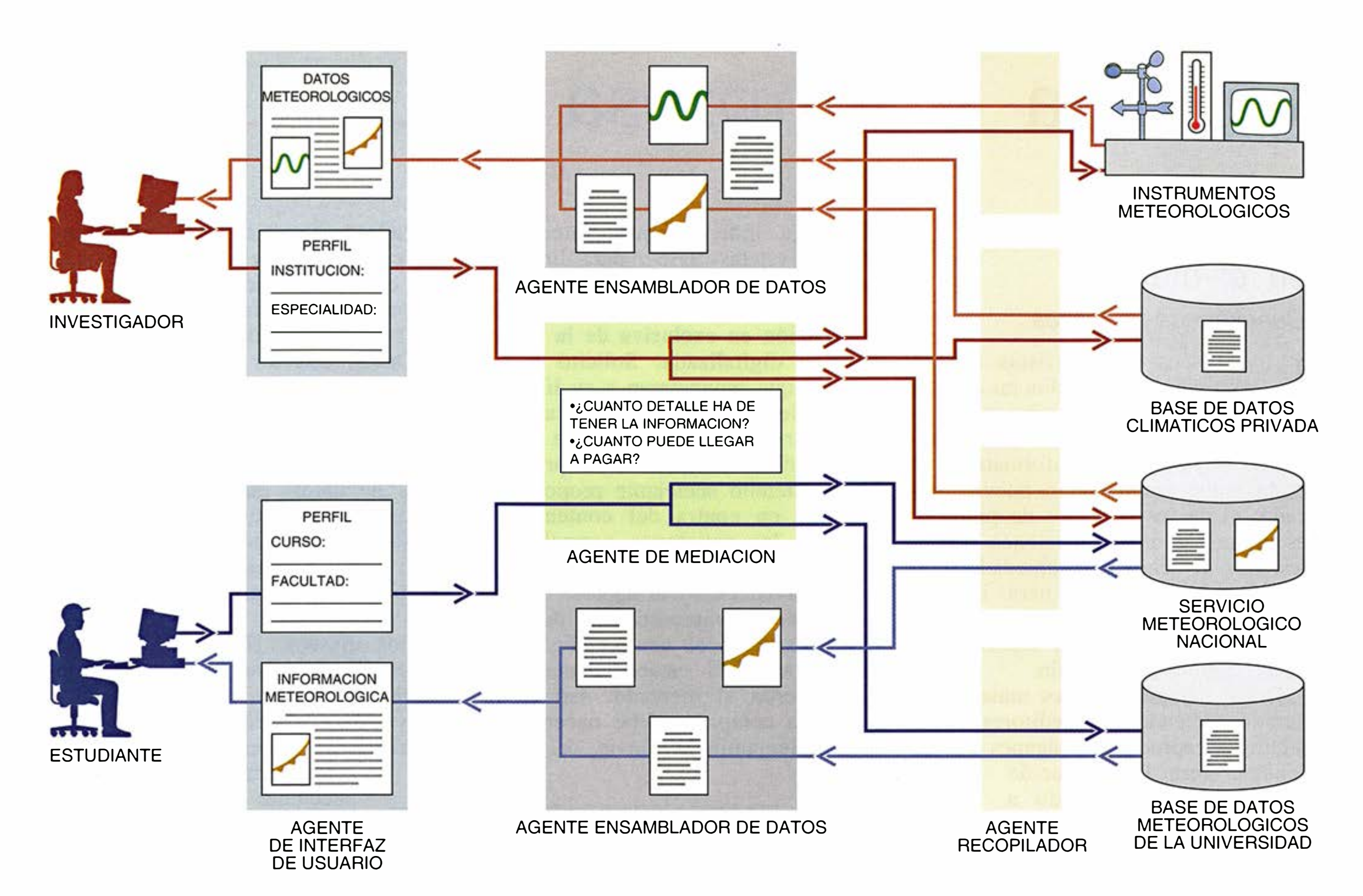
También las bibliotecas, depósitos habituales de las revistas, resultarían afectadas por estos corrimientos. Los ordenadores donde se almacenan las publicaciones electrónicas podrían residir en un laboratorio y no en un edificio de biblioteca. Se conservaría el cargo de bibliotecario, pero sus funciones no serían ya las mismas. A los bibliotecarios, codo a codo con los editores, les ha sido tradicionalmente encomendada la responsabilidad de poner orden en el caos académico. Sin embargo, hasta ahora han sido informáticos, y no bibliotecarios, quienes han creado los instrumentos que permiten moverse por Internet.

Daniel E. Atkins quiere que sea la Escuela de Documentación y Biblioteconomía de Michigan la encargada de invertir esa tendencia. Atkins ha dedicado la mejor parte de su carrera a trastear con ordenadores de gran potencia. Se propone ahora redefinir la tarea del bibliotecario, al que imagina como un profesional que reúna en sí las destrezas del licenciado en informática, del graduado en empresariales e incluso un poco del bibliotecario de vieja escuela.

En septiembre le fue concedida a la Universidad de Michigan una subvención para una biblioteca digital patrocinada por la Fundación Nacional de Ciencias (*NSF*) y otros dos organismos públicos estadounidenses. La subvención de Michigan está prevista para el desarrollo de técnicas que ayuden a estudiantes y profesores a vadear los insondables fondos de información disponibles en las ciencias de la Tierra y del Espacio.

En el programa de la *NSF* se cuentan también la Biblioteca Pública de Nueva York, la Escuela Secundaria Superior Stuyvesant de esa misma ciudad y el sistema de escuelas públicas de Ann Arbor; participan asimismo IBM y Elsevier. Atkins y su equipo tratarán de sacar partido de "agentes", herramientas informáticas a las que se ha dado gran publicidad (aunque rara vez se han llevado a la práctica) originarias de investigaciones en inteligencia artifi-

5. PAUL H. GINSPARG es un editor de "sub-escritorio" que trabaja en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Le vemos en su oficina, junto a una Hewlett-Packard 9000 que contiene una serie de bases de datos; de ella se abastece un número de físicos cada vez mayor, que van dejando de lado las revistas impresas.



6. RED DE "AGENTES" informáticos en fase de desarrollo en la Universidad de Michigan. Actuando a petición de un investigador o estudioso, la red habría de operar como un bibliotecario avezado en referencias bibliográficas. Tras serle dirigida una pregunta : "¿Qué clima tiene Madrid?", el agente de la interfaz de usuario extrae un perfil a partir de informaciones almacenadas en su base de datos. La petición se canaliza hacia el agente de mediación, que evalúa tal perfil para determinar cuánto detalle ha de tener la información recuperada y cuánto puede el usuario pagar por ella. El agente de mediación determina qué recursos de información deben asignársele a cada tipo de usuario. El investigador puede tener acceso a datos meteorológicos en tiempo real y a bases de datos, mientras que se envía al estudiante hacia fuentes de información pública menos onerosas. Un agente de recopilación se encarga entonces de efectuar la búsqueda en las bases de datos pertinentes. Un agente de fusión de datos ensambla la información recopilada —textos, mapas, gráficos y datos sin procesar— antes de retransmitirla al agente de usuario, que la mostrará en forma de documento en la pantalla del estudiante o del investigador.

cial, capaces de recuperar información o de asumir otras tareas automatizadas. Estos agentes tratarían de reproducir mediante programas algunas de las funciones de un bibliotecario de referencia.

El proyecto de biblioteca digital está explorando nuevas formas de combinar la recuperación de información con instrumentos de laboratorio accesibles a través de Internet. Atkins encabeza otro proyecto financiado por la *NSF,* llamado UARC, siglas en inglés de "Laboratorio Abierto de Investigación de la Atmósfera Superior", sobre el aprovechamiento de los instrumentos de investigación instalados en ambientes muy distantes. Un "laboratorio abierto" utiliza redes electrónicas de suerte tal que los investigadores de todo el mundo puedan presenciar los resultados de un experimento a la vez que éste se realiza. También se están desarrollando proyectos cooperativos en biología molecular.

A lo largo de dos años, el UARC ha proporcionado acceso mutuo las veinticuatro horas del día a científicos de diversas instituciones (SRI International, Lockheed, el Instituto Meteorológico Danés y las universidades de Alaska, Maryland y Michigan, entre otras) y acceso a las lecturas de instrumentos situados en la costa suroccidental de Groenlandia para la observación del viento solar. Esta batería de programas permite que los científicos de estas localidades tan alejadas intercambien comentarios mientras observan las líneas de traza en el radar de dispersión incoherente y otros instrumentos encargados de seguir el impacto que producen en la atmósfera las ráfagas del viento solar. El proyecto de biblioteca digital de la *NSF* permitirá la ampliación del UARC. Su función será evaluar las formas en que los distintos equipos de investigación gestionan y utilizan las inmensas cantidades de datos de los instrumentos, de conversaciones a través de boletines y sus anotaciones posteriores.

En dicho proyecto, cumplirá al bibliotecario organizar esta información en formas que permitan la reproducción de un experimento seis meses más tarde. La red electrónica difumina las fronteras entre el experimentalista, el autor, el editor, el recensor y el archivero. Como induce a pensar el trabajo de Paul Ginsparg y de Daniel Atkins, se presenta la necesidad de un nuevo marco institucional para habérselas con la plétora de conocimientos científicos y de datos en que éste se funda.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOS ALAMOS E-PRINT ARCHIVES. Disponible en World Wide Web, con la dirección http://xxx.lanl.gov/

STEVAN HARNAD'S ELECTRONIC ARCHIVE. Disponible en World Wide Web, con la dirección http://www.princeton.edu/~harnad/

Ciencia y empresa

Informática en el museo

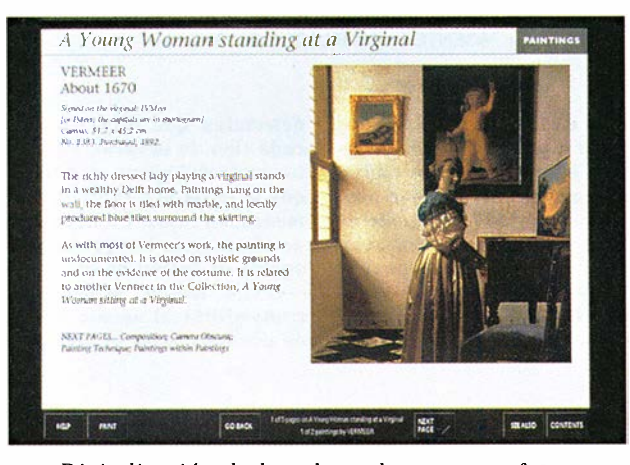
Cuestión de derechos

Los museos y los artistas no son los únicos interesados en acercar el arte al público. Ante las perspectivas de pingües beneficios, las empresas de programas informáticos se están embarcando en un nuevo mercado: el de los derechos de pinturas, esculturas y otras creaciones digitales. Los derechos de propiedad facultan a una compañía para insertar obras de arte en boletines electrónicos o incorporarlos en CD-ROM y otros medios de difusión.

Desde tiempo atrás, los museos han venido cediendo a los editores el derecho de reproducir imágenes de sus fondos. Pero la revolución electrónica ha arrastrado a esos centros de cultura hacia un terreno de vacíos legales y técnicamente inexplorado. Los directores de los museos temen perder el control de sus colecciones: la falsificación y la alteración de las obras maestras es mucho más fácil cuando las imágenes están en forma digital. Además, los directores, que no suelen estar familiarizados con los medios de difusión electrónicos, deben confiar en empresas ajenas para difundir las versiones digitalizadas de sus colecciones. Si tenemos presente que, para finales de este año, habrá, sólo en Estados Unidos, casi diez millones de ordenadores equipados con CD-ROM, doble que el año pasado, advertiremos que lo que anda en juego reviste una importancia creciente.

Los problemas sobre el derecho de propiedad de las obras pasadas a formato digital emergieron a finales de los ochenta, cuando museos y galerías entraron en contacto con Bill Gates, fundador de la Microsoft Corporation. Se interesó éste en la adquisición de los derechos de obras que pudieran formar la base de futuros productos informáticos. Pero el consejo de dirección de la empresa no acababa de ver claras las posibilidades de un mercado de ese tipo de imágenes, y se negó a financiar la iniciativa. Gates creó entonces otra compañía independiente, Interactive Home Systems (IHS), para llevar a cabo su proyecto.

En un principio, Gates pretendía la adquisición en exclusiva de la reproducción digitalizada. Solicitó a los museos que renunciaran a su libertad de vender imágenes digitalizadas a cualquier otra compañía y de fabricar productos comerciales propios. No se atendió semejante proposición que iba en contra del contenido y tono de las peticiones normales de permisos. Los representantes de los museos rechazaban la audacia impertinente de los representantes de IHS. Otros expertos sí comprendieron la estrategia. "IHS estaba dispuesta a poner cerco al mercado; eso es lo que toda compañía debe hacer", comenta Benjamin H. Davis, del Instituto de Tecnología de Massachusetts.



Digitalización de las obras de arte, una forma prometedora de divulgar los fondos museísticos

IHS optó por suavizar las formas e incluso cambiar el nombre. Transformada en Continuum Productions, no busca ya la exclusividad de los derechos y se presenta con un aire menos arrollador. Ha integrado en su equipo consultivo a J. Carter Brown, antiguo director de la Galería Nacional de Arte de Washington, D.C. La nueva empresa ha firmado ya contratos con el Museo de Arte de Seattle, la Galería Nacional de Londres y la Fundación Barnes, entre otras instituciones. Dispone ya de un fondo de unas 200.000 imágenes, de las cuales unas 25.000 pertenecen al mundo de las bellas artes. Las hay también de ciencia, música e historia. Microsoft cuenta con su predicamento en el mercado informático para promocionar con ventaja el nuevo producto ante el consumidor.

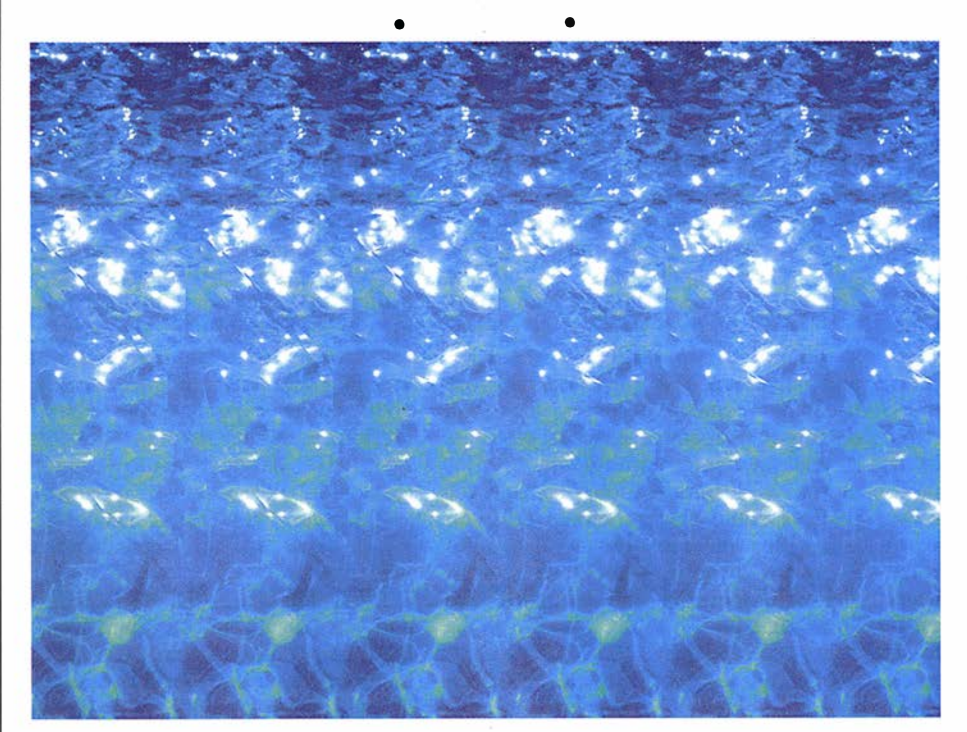
Aparece todavía desdibujado el perfil del consumidor medio. Stephen B. Davis, director de desarrollo de Continuum, anuncia que la empresa configurará dos clases de productos: una agencia almacén de medios electrónicos de difusión y una serie de bases de datos, que espera poner a disposición del público a través de CD-ROM o de una red electrónica.

No debe sorprendernos que entre los primeros usuarios de obras de arte digitalizadas descubramos los propios museos. Hace tres años, el Museo de Arte de Seattle puso en marcha ViewPoint, una cabina interactiva desarrollada por Continuum. El ordenador, gobernado por pantalla táctil, permite al usuario inspeccionar el depósito, como quien repasa la lista de productos ofrecidos por el supermercado. La Galería Nacional de Londres instaló recientemente un dispositivo semejante, la Micro Gallery; la Galería Nacional de Washington, D.C., está desarrollando un sistema de cabina similar, aunque más ambicioso. Estas dos últimas trabajaron con Cognitive Applications, una firma británica de productos informáticos.

Microsoft compró los derechos a la Micro Gallery británica y reconvirtió el sistema en un CD-ROM. Del producto resultante, "Art Gallery", se han vendido 100.000 unidades. Pero Gates no está solo en la arena. Digital Collections, por ejemplo, vende varios CD-ROM de arte, y comienzan a florecer enciclopedias de arte digitalizado. Algunos museos —especialmente los pequeños y más atentos a las posibilidades técnicas— están haciéndose cargo ellos mismos del asunto y ponen sus colecciones a disposición en Internet, vía la World Wide Web (Malla Mundial). La propia Institución Smithsoniana se ha subido al carro y ofrece imágenes a través de America Online.

Temen ciertos críticos que la limitada resolución y escasa exactitud de los colores de los monitores de ordenador degraden la calidad del arte. La mayoría de los museos, sin em-

Secretos en estereograma



Encajan en el perfil de ciertas drogas ilícitas, adictivos, y provocan estados de euforia, de irritabilidad y laxitud. Como el LSD, se consiguen en forma de papelinas. Sin embargo, aunque parecen de origen psicodélico, los estereogramas nacen de la combinación de la fisiología, la investigación militar y la habilidad artística.

La popularidad de la representación tridimensional de imágenes bidimensionales se remonta a principios del siglo XIX, cuando se inventó el estereoscopio. Pero hasta los años cincuenta del nuestro no se crearon los estereogramas de puntos aleatorios, que recuerdan las pinturas de Jackson Pollock. En aquella época, de acuerdo con el número de octubre de 1994 del *American Mathematical Monthly*, el psicólogo e ingeniero Bela Julesz miró a través del estereoscopio dos fotografías aéreas, tomadas bajo ángulos ligeramente diferentes, de una zona camuflada. Observó que unos tanques camuflados quedaban a la intemperie. Julesz determinó que la percepción de la profundidad no tenía lugar en el ojo sino en una zona superior del cerebro.

En 1979, un antiguo discípulo de Julesz, Christopher W. Tyler, creó el estereograma de toma única, semejante al aquí mostrado. Tales imágenes no necesitaban de estereoscopio; con un poco de adiestramiento, el ojo podía hallar la imagen tridimensional escondida.

Para ver de qué va el asunto, sólo tiene que cruzar los ojos hasta que los dos puntos encima de la imagen se conviertan en cuatro. Después, por un golpe de suerte o a fuerza de voluntad, haga que los dos puntos centrales de su alucinación se suelden en uno hasta que sólo queden tres puntos. Tome una aspirina. Enfoque el punto central. Cuando lo vea claramente y en reposo, lleve lentamente la mirada hacia abajo. Observará entonces partes de la imagen que se curvan de manera cóncava en forma de dos mamíferos marinos, a menos que se cuente entre el 2 por ciento de la población que son estereociegos.

MARGUERITE HOLLOWAY

bargo, parecen firmemente convencidos de que el trato fomenta el interés por el trabajo original. Distinto es mantener el control de las imágenes. Característica de Art Gallery —y de cualquier CD-ROM no protegido— es la de permitir a los usuarios copiar las imágenes desde el disco y manipularlas en el ordenador. Nunca ha sido tan fácil pintarle un bigote a Mona Lisa. Deformar las reproducciones de las grandes obras de arte es un juego de escasa novedad, pero lo que sí es nuevo es la facilidad de crear, conservar o eliminar los cambios.

El arte digitalizado es un medio con el que uno puede hacer literalmente cualquier cosa. Es transmisible y alterable, y a partir de él podemos crear nuevo arte, lo que ha provocado la aparición pirata en Internet de protagonistas de historietas y copias reproducidas de desnudos publicados en las revistas de ese género. Pero también corren imágenes manipuladas de obras de arte. Aunque la limitada resolución de los actuales CD-ROM o de las imágenes en línea restringe su utilidad, pronto será fácil almacenar y transmitir obras de arte digitalizadas de alta calidad. Algunos expertos de los museos están ideando la manera de cifrar tales imágenes para que sólo los usuarios autorizados puedan acceder a ellas.

COREY S. POWELL

Los seguros y los médicos

Economía y enfermedad

¿Tiene usted un buen médico? Pero, ¿cuán bueno? Muy bueno, bastante bueno, bueno a secas... El lector quizá se sienta incapaz de responder a la pregunta. Dudas que no asaltan a muchas mutuas, hospitales privados y compañías de seguros. Contratan y despiden a los médicos basándose en análisis estadísticos de las características de su manera de ejercer. En los juzgados se amontonan las demandas. No sólo en Europa. En los estados americanos de Texas, Tennessee y Washington, D.C., guardan turno las reclamaciones de médicos “deseleccionados”, como llaman allí a los despedidos.

Se ponen en cuestión, sobre todo, los criterios empleados para decidir quién se queda y quién se va. En el Distrito de Columbia, las aseguradoras Blue Cross (Cruz Azul) y Blue Shield (Escudo Azul) ahorraron a médicos prestigiosos los duros exámenes que otros hubieron de sufrir. La compañía Cigna canceló la mayoría de todos sus contratos con médicos negros en Kansas City. Pero en este caso, ilustrativo para otras regiones del planeta, no se trataba de un criterio racista: la compañía de seguros despidió a los médicos demasiado caros, y éstos eran mayoritariamente negros. En la carestía influían otros

factores, nuevamente sin nada que ver con el color: las necesidades médicas varían con la edad y la enfermedad del paciente; los médicos que tratan a un sector de la población más viejo o más enfermo pueden costar a la compañía más por paciente que los que tratan a jóvenes y sanos.

Susan Salem-Schatz y sus colaboradores del Plan de Atención Médica de los habitantes de Harvard estudiaron a los médicos de su grupo y hallaron que, cuando se tenían en cuenta las circunstancias de sus pacientes, el perfil del médico podía cambiar de raíz. Midieron el porcentaje de pacientes que cada médico enviaba al especialista. Muchos perfiles asignan peor calificación a los médicos que envían más pacientes al especialista, porque los especialistas son caros. Cuando se corrigieron las cifras de acuerdo con la edad y sexo de los pacientes, una cuarta parte de los médicos sobresalía como derrochadores y una cifra similar como remisos a la visita al especialista. Pero si se tomaba en consideración la gravedad de la dolencia de cada paciente, la fracción de los extremos menguaba hasta la mitad. Aún más: algunos de los médicos que de salida parecían menos propensos a las consultas del especialista pasaban a ser los más derrochadores en la nueva criba.

El criterio de las características de los pacientes constituye la razón definitiva para determinar la carestía de los médicos y la bondad de su relación con el enfermo. Con frecuencia es, además, la única información que se puede obtener a bajo coste. "Pero hay defectos sistemáticos en los datos procedentes de las compañías de seguros", dice Deborah W. Garnick, de la Universidad de Brandeis. Los análisis sólo valen lo que las claves de diagnóstico que los médicos consignan en los impresos.

El equipo de Jonathan P. Weiner, de la Universidad Johns Hopkins, ha desarrollado un sistema que traduce miles de millones de claves a 50 grupos de cuidados ambulatorios (GCA) que describen la gravedad aproximada del estado de cada paciente. Un plan de asistencia sanitaria puede comparar el éxito de diferentes médicos en el tratamiento de pacientes de la misma categoría de GCA y formarse así una idea bastante aproximada de sus méritos relativos.

En el pasado, los médicos a los que se llamaba la atención por gastar demasiado solían responder que sus pacientes estaban más enfermos. Las correcciones por CGA han demostrado que muchos de ellos tenían razón. Dan L. Gunselman, que ayudó a poner en práctica este sistema corregido, reconoce que todavía presenta puntos débiles, especialmente cuando se trata de dar cuenta de dolencias catastróficas. "Si alguien sufre un accidente de automóvil y necesita tratamientos por valor de decenas de millones de pesetas", indica, "ninguna corrección restablecerá el perfil primario de coste del médico".

Siempre habrá alguna variación que no se puede tener en cuenta. "Ningún sistema captará los matices", dice Weiner. Por eso él y otros se oponen al uso exclusivo de perfiles para decidir a qué médicos contratar y a cuáles despedir. En lugar de tomar decisiones basadas en GCA o cualquier otro criterio único, las mutuas y hospitales deberían usar los perfiles como manera rápida de identificar los médicos cuyos historiales —buenos o malos— merecen ulterior atención. Opinión que comparte Salem-Schatz.

PAUL WALLICH

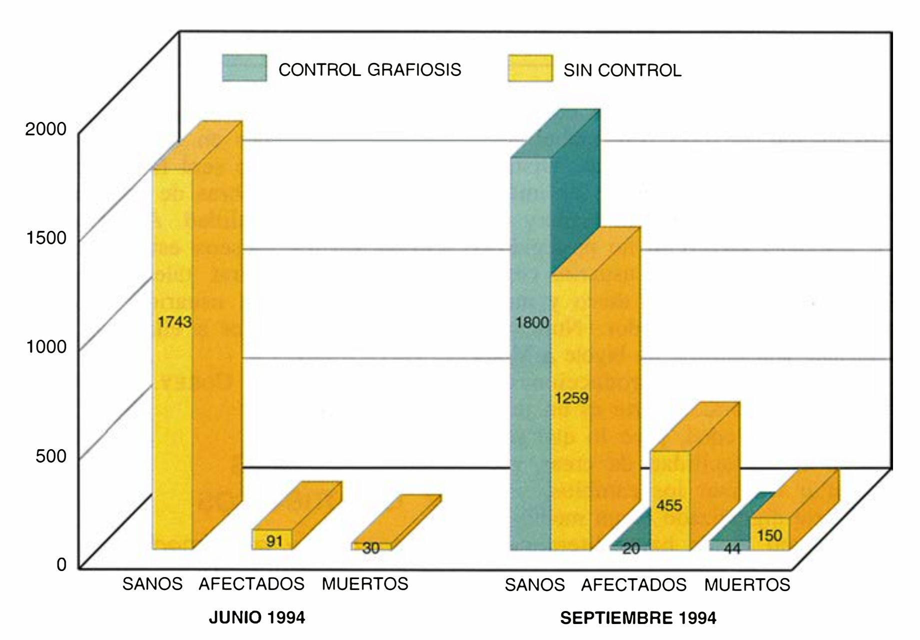
Grafiosis del olmo

Arboledas de la Alhambra

La grafiosis, o enfermedad holandesa del olmo, constituye uno de los principales problemas en los ecosistemas urbanos y forestales de Europa, Asia y América del Norte. Se trata también de una de las enfermedades forestales más estudiadas. Desde 1919 se ha identificado al hongo *Ceratocystis (Ophiostoma) ulmi* como el agente causante, siendo sus dos razas *agresivas*, la norteamericana *NAN* y la euroasiática *EAN*, las responsables del elevado incremento de la mortalidad de los olmos observada en Europa desde los años cincuenta.

En España esta enfermedad no afectaba significativamente a la viabilidad de nuestras olmedas, que en el sur se denominan alamedas y a los árboles que las componen, álamos negros, hasta la introducción en 1980 de la raza agresiva *NAN*. La ineficacia de las medidas de control adoptadas ha favorecido su rápida expansión por todo el territorio, y actualmente son raras las olmedas en las que la enfermedad no está presente.

La incidencia social de la enfermedad se ha puesto de manifiesto en los lugares de especial significación histórica o cultural, como es el caso de la Alhambra, donde, a finales de la primavera de 1994, se detectaron los primeros síntomas. Suelen empezar éstos con un amarilleamiento de las hojas de algunas ramillas de la copa. Luego, las ramas se marchitan y las hojas se enrollan hacia el haz; los síntomas foliares se extienden árbol abajo, produciéndose la progresiva desecación y muerte del olmo. Los síntomas son consecuencia de la inva-



Evolución de la grafiosis del olmo en las olmedas de la Alhambra (número de árboles sanos, afectados y muertos) hasta finales de septiembre de 1994 (derecha), *en relación con la situación observada al inicio de la puesta en práctica del sistema de control, a finales de junio* (izquierda). *En color verde se representa la situación estimada de las olmedas, a finales de septiembre, asumiendo ausencia total de control de la grafiosis y un moderado coeficiente de infección (5×)*

sión fúngica del xilema funcional, correspondiente al último anillo de crecimiento, y de su posterior destrucción mediante la liberación de toxinas.

El vector de la enfermedad lo constituyen tres especies de insectos escolítidos (*Scolytus scolytus*, *S. multistriatus* y *S. kirschii*), especializados en el transporte de las esporas del hongo. Estos barrenillos, como llama el pueblo a tales insectos, se reproducen en el floema de ramas desgajadas del árbol, así como en los pies de olmos debilitados por padecer otras enfermedades, defoliados por la acción de otros insectos o afectados por la sequía o deficiencia nutricional.

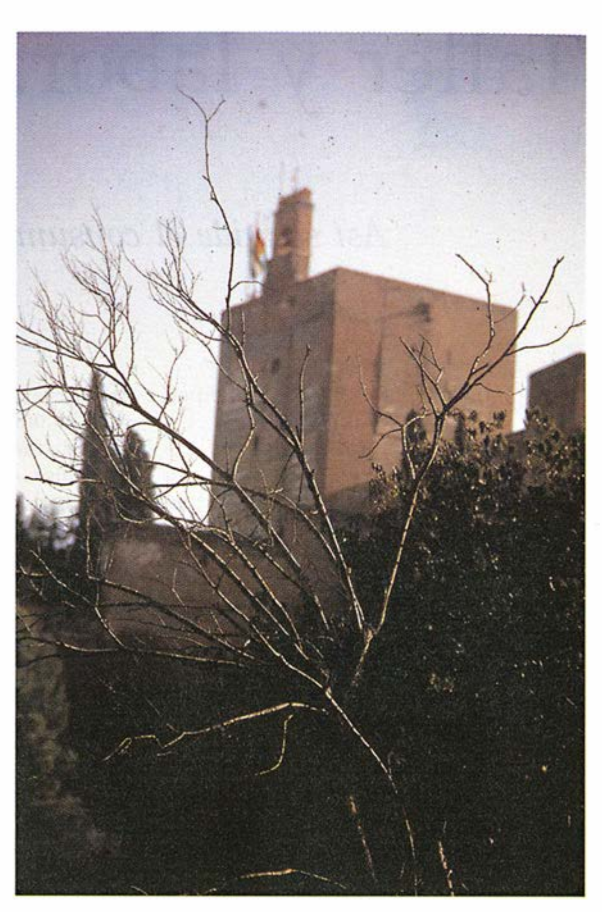
Durante el vuelo de dispersión, destinado a la búsqueda del material de reproducción apropiado, los barrenillos muerden las horcaduras de los brotes jóvenes de las copas, lo que permite la inoculación del hongo. El desarrollo de la infección y el progresivo debilitamiento del olmo desencadenan el ataque masivo de los escolítidos, lo que acelera la muerte del árbol enfermo. El mecanismo de transmisión a corta distancia está favorecido por la existencia de injertos radiculares entre los olmos próximos, que facilitan la transmisión del hongo entre ellos.

La distancia del vuelo de dispersión de los insectos vectores limitaría notablemente el ritmo de expansión de la enfermedad e impediría el contagio de las olmedas aisladas geográficamente de los focos de infección. Sin embargo, el trasiego de leñas de olmo (muy abundantes en la actualidad en nuestro país) que contienen importantes poblaciones de barrenillos ha favorecido su rápida propagación.

Esta enfermedad, que actualmente se encuentra en fase epidémica en España, ha sido objeto de programas de control en EE.UU., Holanda y el Reino Unido. Gracias a los conocimientos obtenidos en estos países se ha podido aplicar un programa de control, basado en precisas estrategias, destinadas a la reducción de la tasa de infección, así como a la recuperación de los olmos afectados.

De dicho programa se encargaron expertos de la Estación Experimental del Zaidín de Granada, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y técnicos del Patronato de la Alhambra y el Generalife. El primer paso consistió en la realización de un inventario de todos los olmos de diámetro superior a 5 cm. Una vez numerados, se creó un mapa vegetal de la olmeda a escala 1:500. Esto ha permitido conocer el número de olmos (1864; el 23,3 % con diámetro superior a 45 cm), su estado fitosanitario, así como la localización de los principales focos de la enfermedad. El número de olmos afectados ha sido de 121 (6,5 %), y más de la mitad (57 %) son olmos singulares, con edades de hasta 165 años.

Se puso especial énfasis en la observación diaria de las copas de los árboles, que posibilitara la detección precoz de las infecciones. La identificación del pie afectado por la infección se realizó mediante triangulaciones efectuadas con ayuda de compases magnéticos. Para acceder a las ramas apicales se emplearon grúas de 30 m de altura o se recurrió a precisas técnicas de escalada arbórea en lugares inaccesibles.



Olmo muerto por grafiosis agresiva

Se eliminaron las zonas afectadas por la infección mediante poda terapéutica, tratamiento que se aplicó a 77 olmos (64 % de los afectados), y que presentaban en su mayoría una superficie foliar afectada inferior al 20 %.

Para mantener bajo control las poblaciones de los insectos vectores, incineramos todo material potencialmente susceptible de ser colonizado por ellos. Ello obligó a talar 44 olmos (36 % de los afectados), en los que los síntomas foliares superaban al 50 %. Se aplicaron también tratamientos con derivados piretroides; desde tierra mediante cañones lanzadores de nube y desde el aire mediante una avioneta convenientemente equipada. El insecticida cumplía tres requisitos: baja peligrosidad para la fauna terrestre, rapidez en la degradación de sus residuos y elevada toxicidad contra los escolítidos.

Se amortiguó el riesgo de contagio a través de los injertos radiculares entre los olmos adyacentes mediante la apertura de zanjas, que fueron nuevamente cubiertas, y que han permitido la desconexión de los sistemas radiculares entre los principales grupos de olmos. En los ejemplares de especial valor se inyectaron fungicidas, cuyo efecto limita el desarrollo del hongo y previene contra posibles infecciones en los olmos no afectados.

¿Cuál fue la eficacia del programa? Si se tiene en cuenta la evolución de la grafiosis en otras áreas peninsulares exentas de control, podemos efectuar una estimación de la situación a finales de verano en la Alhambra (asumimos un coeficiente de infección relativamente moderado). El número de árboles enfermos sería de 455 (24,40 % del total) a finales de septiembre, y la tasa de mortalidad del 8,04 % (150 olmos). La aplicación del programa de control ha permitido la recuperación de una gran parte de los árboles afectados a finales de junio, y ha disminuido a 20 el número de árboles afectados (1,07 por ciento del total). La tasa de mortalidad se sitúa ahora en el 2,36 % (44 olmos), lo que supone una reducción de aproximadamente el 70 por ciento sobre la mortalidad estimada.

A pesar de que los resultados obtenidos son esperanzadores, la ausencia de otros datos con los que contrastar impone una obligada moderación a la hora de evaluar la eficacia a largo plazo del programa de control.

Ramón González
y Pablo Prieto
Estación Experimental del Zaidín
(CSIC)

Taller y laboratorio

Marc Ross y John DeCicco

Así se mide el consumo energético de nuestro automóvil

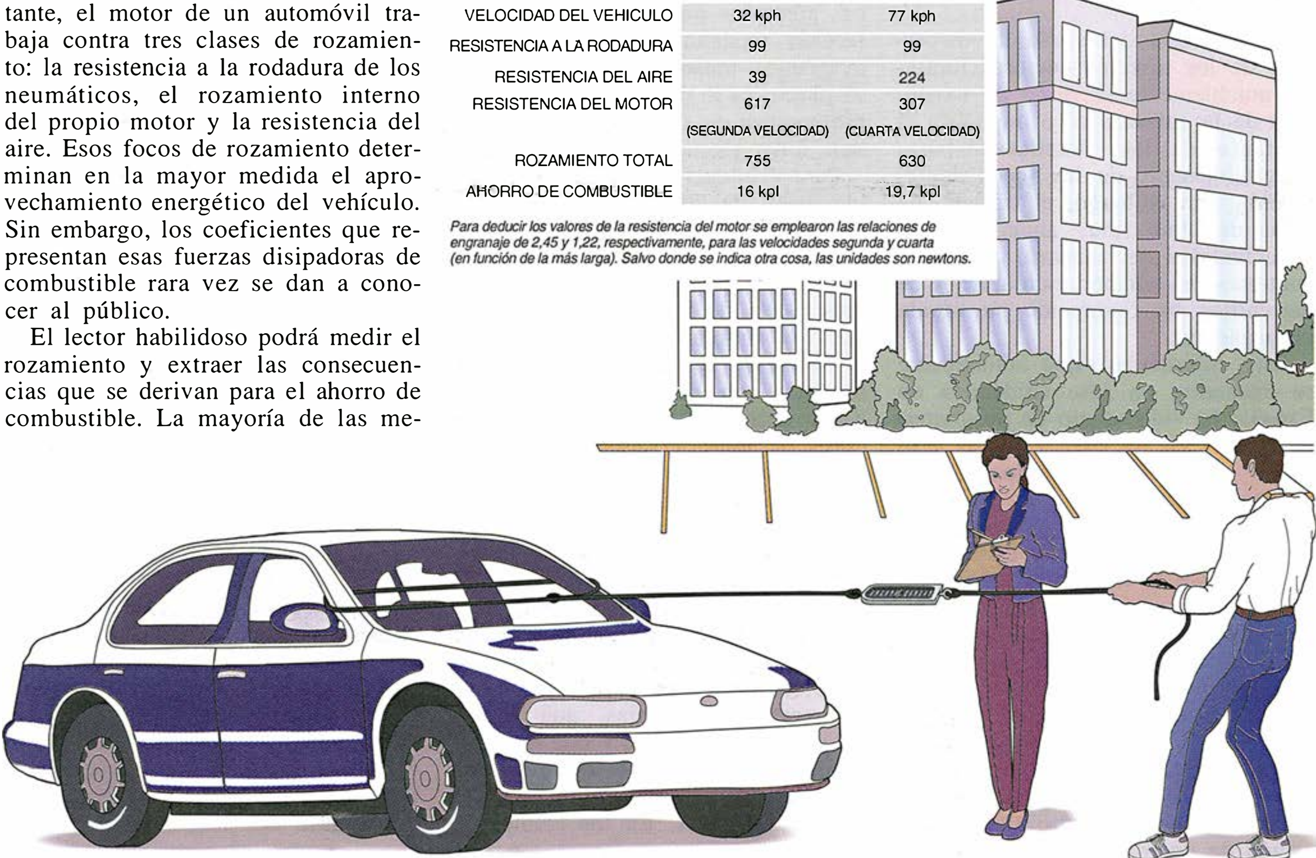
A mucha gente no le preocupan ni poco ni mucho los factores que afectan al rendimiento del combustible que consume un automóvil; dicho de otro modo, qué distancia puede recorrer con un litro de gasolina. Si lográsemos medir de qué forma se emplea esa energía, podríamos intentar sacarle mayor partido a nuestro propio automóvil, mejorar su rendimiento. El laboratorio de proyectos de las factorías se sirve de ese tipo de información en su esfuerzo por elevar el ahorro de combustible en los vehículos del futuro. Concretamente, se dedican a estudiar las fuerzas de rozamiento que es necesario vencer durante la marcha de un vehículo.

En carretera y a velocidad constante, el motor de un automóvil trabaja contra tres clases de rozamiento: la resistencia a la rodadura de los neumáticos, el rozamiento interno del propio motor y la resistencia del aire. Esos focos de rozamiento determinan en la mayor medida el aprovechamiento energético del vehículo. Sin embargo, los coeficientes que representan esas fuerzas disipadoras de combustible rara vez se dan a conocer al público.

El lector habilidoso podrá medir el rozamiento y extraer las consecuencias que se derivan para el ahorro de combustible. La mayoría de las mediciones que proponemos darán resultado únicamente en automóviles de cambio manual. Por otra parte, necesitaremos cierto espacio en una zona de estacionamiento, una balanza, un cronómetro y un tramo de calzada poco frecuentado, llano y recto de un kilómetro de longitud aproximadamente. Nuestros experimentos los llevamos a cabo con un sedán Honda Civic de 1989.

La primera variable a medir es el coeficiente de resistencia a la rodadura de los neumáticos; simbolizamos ese parámetro por C_R. La fuerza necesaria para vencer dicha resistencia es proporcional al peso del automóvil y más o menos independiente de su velocidad. Para medir la resistencia, coloque el vehículo en punto muerto, con el motor apagado, en una zona de estacionamiento plana y lisa. Luego, tire de él con una cuerda que haya pasado por las ventanillas y sujetado a una balanza de resortes. Le será de ayuda un nivel de burbuja afirmado a la cuerda. Otra posibilidad es que empuje el vehículo por detrás con una balanza de baño (proteja el vehículo con una tela gruesa). Debe hallar así una fuerza comprendida aproximadamente entre nueve y 18 kilogramos. En nuestro caso resultó de unos 11 kilogramos.

Por desgracia, es ésta una medición tosca. Si la zona de estaciona-



VELOCIDAD DEL VEHICULO	32 kph	77 kph
RESISTENCIA A LA RODADURA	99	99
RESISTENCIA DEL AIRE	39	224
RESISTENCIA DEL MOTOR	617 (SEGUNDA VELOCIDAD)	307 (CUARTA VELOCIDAD)
ROZAMIENTO TOTAL	755	630
AHORRO DE COMBUSTIBLE	16 kpl	19,7 kpl

Para deducir los valores de la resistencia del motor se emplearon las relaciones de engranaje de 2,45 y 1,22, respectivamente, para las velocidades segunda y cuarta (en función de la más larga). Salvo donde se indica otra cosa, las unidades son newtons.

1. Resistencia a la rodadura y resistencia del motor: para hallarlas podemos tirar del vehículo con una cuerda sujeta a una balanza de resortes. La tabla es una lista de las fuerzas de rozamiento y del rendimiento del combustible que los autores calcularon a partir de sus experimentos con un Honda Civic de 1989

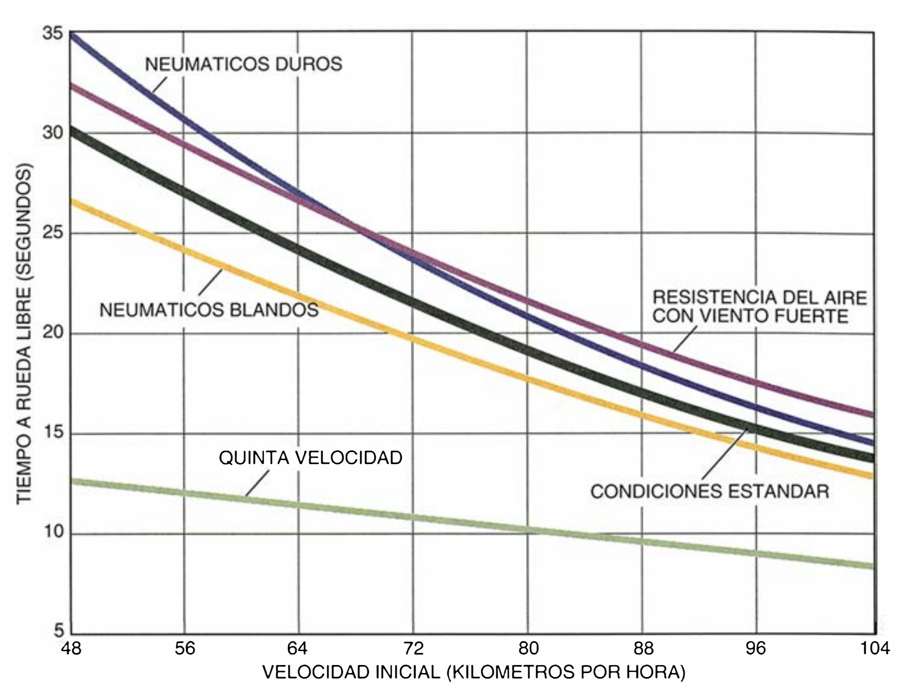
miento o la balanza están inclinadas sólo 0,1 grados respecto a la horizontal, ello puede hacer que el resultado varíe en más de dos kilogramos para un típico automóvil de 1300 kilogramos. Es, además, difícil mover el vehículo a velocidad constante, lo que es obligado para evitar los efectos de las fuerzas de inercia. Se aconseja dividir la tarea entre dos personas; una de ellas que tire y la otra que lea la balanza. Para compensar la pendiente, repítase el experimento en sentido contrario y promédiense los resultados. Para obtener el coeficiente de resistencia a la rodadura, divida la fuerza medida por el peso del vehículo, que encontrará en el manual del usuario. Con unos neumáticos de origen correctamente inflados, el coeficiente deberá resultar del orden del uno por ciento.

Aparte del efecto de la presión de inflado, hay varios factores que pueden frustrar la medición de la resistencia a la rodadura; por ejemplo, el rozamiento en los cojinetes, que afortunadamente suele ser mucho menor que la resistencia en los neumáticos. Otro factor lo constituye la resistencia de los frenos, cuyo origen es el leve contacto existente entre las pastillas y los rotores de los frenos de disco. Ese contacto podría contribuir con una resistencia de unos tres cuartos de kilogramo, más o menos, equivalentes aproximadamente al cinco por ciento de la resistencia a la rodadura. A ésta afecta también la rugosidad de la superficie de la calzada; la máxima precisión la dan las superficies lisas y pavimentadas.

Mida luego la resistencia del motor. El procedimiento a seguir es el mismo que para la resistencia a la rodadura, salvo que el cambio debe estar en la marcha más larga. La lectura en la balanza proporciona la fuerza combinada de la resistencia a la rodadura y el rozamiento interno en el motor.

Con nuestro modelo Honda Civic obtuvimos unos 45 kilogramos, lo cual significa que la resistencia del motor viene a triplicar la de rodadura. (En las condiciones normales de marcha, la resistencia del motor es algo menor, pues al apretar el acelerador la mariposa de los gases se abre un poco más que con el simple movimiento por inercia.) Pero la medición resulta un tanto tosca, porque la fuerza no se mantiene constante a lo largo de la carrera de los cilindros.

La deducción del coeficiente que caracteriza a ese rozamiento resulta algo complicada. Nuestras medidas tenemos que compararlas con el trabajo efectuado por un "motor estándar". Por definición, un motor estándar genera un trabajo de 100 joules para rotar el cigüeñal una vez con la mariposa casi cerrada, o sea, con el pedal del acelerador en su posición más alta, en reposo.



2. Los tiempos a rueda libre para que la velocidad de un típico automóvil de 1993 disminuya en 10 kilómetros por hora desde una velocidad inicial dependen de las variaciones respecto a las condiciones estándar (vehículo en punto muerto; resistencia del aire media y presión de los neumáticos)

El trabajo real del rozamiento lo dará entonces el producto de 100 joules por el coeficiente de rozamiento en el motor, C_E (término acuñado expresamente para este artículo). Para deducir dicho coeficiente, necesitaremos conocer de antemano el volumen que barren los pistones (la llamada cilindrada del motor). Ese valor, expresado en litros, está incluido en el manual.

Precisaremos también conocer el número de vueltas que da el cigüeñal del motor por cada metro que se desplaza el vehículo con el cambio en la marcha más larga. Representemos por n ese número.

Para averiguar n, leeremos las revoluciones por minuto en el tacómetro del coche (si lo tiene) mientras se conduce en marcha alta. Divida ese número por la velocidad del vehículo en kilómetros por hora, luego vuelva a dividir por 60 y por 0,447 metros por segundo. (Un método más complicado, ideal para las personas que disfruten mascando números, sería consultar la relación de engranaje global en el manual y emplear el perímetro de las ruedas para calcular la distancia que recorre el automóvil y el número de vueltas de cigüeñal.) Como comprobación aproximada de sus resultados, tenga en cuenta que los vehículos se diseñan de modo que el número n varía desde 1 para los motores V-8 de gran cilindrada hasta casi 2 para los motores pequeños.

En nuestro experimento, multiplicamos la fuerza neta medida de 34 kilogramos por 9, al objeto de convertir los kilogramos en newtons, que es la unidad métrica internacional de fuerza. En el caso de nuestro automóvil, es $n = 1{,}68$ revoluciones por metro y la cilindrada del motor es de 1,5 litros. Así pues, $C_E = 34 \times 9/(100 \times 1{,}68 \times 1{,}5) = 1{,}3$. El trabajo del rozamiento será de 130 joules por litro por revolución.

La última fuerza de rozamiento con la que hemos de enfrentarnos es la resistencia del aire. Para hallarla, hay que poner el automóvil en carretera. El procedimiento se basa en medir el tiempo que tarda el vehículo en perder 19 kilómetros por hora desde una velocidad inicial. Es necesario recorrer el mismo trecho de carretera varias veces en ambos sentidos y promediar luego los resultados con el fin de corregir en lo posible los efectos de las pendientes y del viento.

Esta parte del experimento requiere dos personas; una dedicada plenamente a la conducción y la otra para manejar el cronómetro y anotar los resultados. Busque una carretera lisa, llana y poco transitada a la hora en

Coeficientes de rozamiento

Las fuerzas de rozamiento, aparte de la de los frenos y de los accesorios, en cuanto que se oponen al movimiento del vehículo, están caracterizadas mediante los coeficientes adimensionales C_R (resistencia a la rodadura), C_D (resistencia del aire) y C_E (rozamiento en el motor). La resistencia a la rodadura está dada por $F = C_R Mg$, donde F es la fuerza necesaria para vencer la resistencia y Mg es el peso útil del vehículo (técnicamente, la masa del vehículo multiplicada por la aceleración gravitatoria).

La resistencia del aire puede hallarse con la fórmula $F = 0{,}5\, \rho\, C_D A v^2$, donde ρ es la densidad del aire, que vale aproximadamente 1,2 kilogramos por metro cúbico a baja altitud y a temperatura normal, A es la superficie frontal del automóvil y v la velocidad del mismo.

La fórmula a emplear para calcular el rozamiento en el motor es $F = C_E\,(f_0/\varepsilon) n\, V (R/R_{alta})$, donde f_0 es el trabajo a realizar contra el rozamiento por litro de cilindrada para rotar una vuelta el cigüeñal de un "motor estándar" equivalente a 100 joules por revolución; ε es el rendimiento de la transmisión, aproximadamente igual a 0,95 con los engranajes en toma; n es el número de revoluciones del cigüeñal por metro recorrido; V es la cilindrada del motor en litros; R es la relación de engranaje en uso en el cambio de velocidades; y R_{alta} es la relación de engranaje correspondiente a la marcha más larga del cambio de velocidades.

Los coeficientes pueden calcularse a partir de las mediciones a rueda libre. La cantidad $C_D A$ está dada por

$$C_D A = \frac{0{,}447\, \Delta v\, M\,(1/t_1 - 1/t_2)}{[0{,}5\, \rho\, (v_1^2 - v_2^2)\,(0{,}447^2)]}.$$

Aquí Δv es la variación (positiva) de velocidad (en millas por hora) durante el movimiento a rueda libre y vale 10 (una milla es igual a 1,609 km); M es la masa del vehículo y los pasajeros, en kilogramos; t_1 es el tiempo a rueda libre más rápido, en segundos, y t_2 el más lento; y v_1 es la velocidad media, en millas por hora, en el intervalo más alto de velocidades y v_2 es la velocidad media en el intervalo más bajo de velocidades. La constante 0,447 son los metros por segundo equivalentes a una milla por hora.

El coeficiente de resistencia a la rodadura puede hallarse con

$$C_R = (0{,}447/9{,}8)\,[\Delta v/t - (0{,}447/2M)\, \rho\, C_D A v^2]$$

donde pueden emplearse tanto t_1 y v_1 como t_2 y v_2.

Una vez determinados $C_D A$ y C_R y medido el tiempo a rueda libre con el vehículo en la marcha más larga, el rozamiento en el motor puede hallarse mediante

$$C_E = \frac{[0{,}447\, \Delta v\, M/t - 9{,}8\, M C_R - (0{,}447^2/2)\, \rho\, C_D A v^2]}{(f_0 n\, V/\varepsilon)}$$

Conocidas las tres fuerzas de rozamiento, es posible calcular el consumo de gasolina del vehículo. Sea $\sum F$ el trabajo (en joules) que realiza el rozamiento cuando el vehículo se desplaza un metro; o sea, el que realizan todas las fuerzas de rozamiento expresadas en newtons. Para obtener $\sum F$, hay que multiplicar por $1/\varepsilon$ las fuerzas de resistencia del aire y de resistencia a la rodadura, y por ε la resistencia del motor. La economía de combustible en millas por galón será entonces igual a 120.600 kilojoules $\times$ 0,38/(1,609 $\times \sum F$); y en kilómetros por litros será 31863 $\times$ 0,38/ $\sum F$ (teniendo en cuenta que una milla equivale a 1,609 kilómetros y un galón americano equivale a 3,875 litros.)

Se ha tomado como 120.600 kilojoules el poder calorífico inferior de una gasolina estándar; y 38 por ciento es el rendimiento indicado típico de un motor moderno. (El poder calorífico inferior del combustible da cuenta del agua consumida en forma de gas y no en forma líquida.)

que vayan a trabajar. Cuide de no interferir con otros vehículos, ni realice estas mediciones por la noche.

Para determinar la resistencia del aire, mida el tiempo a rueda libre con el pedal del embrague pisado a fondo en dos intervalos de velocidades. Por ejemplo, de 80 a 64 kilómetros por hora primero y, luego, de 64 a 48 kilómetros por hora. Pero asegúrese de que esas velocidades no son peligrosas para el estado de la carretera. Para conseguir unos buenos resultados conviene que ambos intervalos queden suficientemente diferenciados. En nuestro caso, encontramos unos tiempos a rueda libre de 17,7 y 24,0 segundos, respectivamente (o sea, para unas velocidades medias de 72 y 56 kilómetros por hora). A menos que el lector sea un experto, encontrará que los tiempos le varían considerablemente, incluso circulando en el mismo sentido. El velocímetro hay que leerlo continuamente y ser muy sistemático empleando el cronómetro. Practique hasta que le parezca haber adquirido cierta fiabilidad.

Con las fórmulas que se describen en el recuadro de la izquierda, nosotros hallamos que la diferencia entre las fuerzas de resistencia del aire a esas dos velocidades era de 74 newtons para un automóvil de 1110 kilogramos de masa, pasajeros incluidos. (La medición diferencial elimina la resistencia de los neumáticos.) A partir de ese valor, puede deducirse la resistencia del aire a otras velocidades. Por ejemplo, a 112 kilómetros por hora el valor correspondiente lo hallaremos multiplicando por $112^2(72^2 - 56^2)$ la fuerza de resistencia del aire recién calculada. Para el ejemplo aquí tratado, la resistencia del aire a 112 kilómetros por hora resulta ser de 454 newtons.

Lo que deseamos calcular es el rendimiento con que nuestro automóvil hiende el aire. Este es el producto de la superficie frontal del vehículo A, en metros cuadrados, por el coeficiente de resistencia aerodinámica C_D, que es un número adimensional que da cuenta del grado de aerodinamicidad del vehículo. En el recuadro se ofrece la fórmula necesaria. Para el sedán Honda Civic, hallamos que el producto $C_D A$ vale 0,77 metros cuadrados.

Para averiguar el coeficiente de resistencia propiamente dicho, hay que eliminar la superficie frontal. Una manera sería hacer un dibujo de la silueta del vehículo visto exactamente desde delante. Inclúyanse los neumáticos, pero no el espacio vacío entre ellos. Como comprobación, multiplique la anchura por la altura por

0,833, factor típico de los automóviles actuales. Para nuestro modelo Honda Civic, la superficie frontal es de 1,89 metros cuadrados, con lo que el valor medido de C_D es 0,41. El coeficiente de resistencia verdadero sea probablemente inferior; en la información escrita ese valor se estima en torno a 0,35.

Con las observaciones a rueda libre y las fórmulas del recuadro de la página precedente, le será posible comprobar los valores para la resistencia a la rodadura y el rozamiento en el motor deducidos con las mediciones realizadas en el estacionamiento. Para hallar el coeficiente de resistencia a la rodadura, sustituya una de las medidas a rueda libre ya hechas en la fórmula adecuada del recuadro. Nuestro Honda Civic nos dio un coeficiente de 0,0086, valor próximo al que hallamos en el estacionamiento. Téngase en cuenta que la resistencia a la rodadura depende de la presión de los neumáticos. El coeficiente es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la presión de manómetro. Por ejemplo, si rebaja la presión un 20 %, debería el lector encontrar que la fuerza aumenta del orden de un 10 %.

Seguidamente, mida la resistencia del motor en rueda libre. Con el vehículo en directa, mida el tiempo a rueda libre. Pese a que ello confunda la interpretación, deje el motor en marcha durante la medición. Así no bloqueará la dirección cuando apague el motor y podrá hacerse con el manejo del vehículo al final del tiempo a rueda libre sin aminorar aún más la velocidad. En nuestro caso, con el sedán Honda Civic, el tiempo a rueda libre desde 80 a 64 kilómetros por hora resultó de 9,1 segundos. Empleando una de las fórmulas del recuadro, acabaremos por cifrar en 250 newtons la resistencia del motor. Puede comprobar que el coeficiente correspondiente vale 1,0, resultado razonable y posiblemente más exacto que el de 1,3 que hallamos antes.

Los coeficientes de rozamiento calculados aquí pueden emplearse para estimar el ahorro de combustible sin más mediciones. Supongamos que el rendimiento indicado del motor (o rendimiento sin tener en cuenta las pérdidas por rozamiento) sea del 38 por ciento, valor habitual dado por la información escrita. Este número expresa el cociente del trabajo total realizado por los gases sobre la superficie del pistón (durante las carreras de expansión) dividido por la energía de quemado del combustible. El ahorro de combustible se determina entonces de acuerdo con las fórmulas del recuadro.

Nosotros calculamos la economía de combustible para dos velocidades, tal como se muestra en la primera de las ilustraciones. Esas velocidades corresponden aproximadamente a las velocidades medias globales en ciclos de marcha urbana y en autopista.

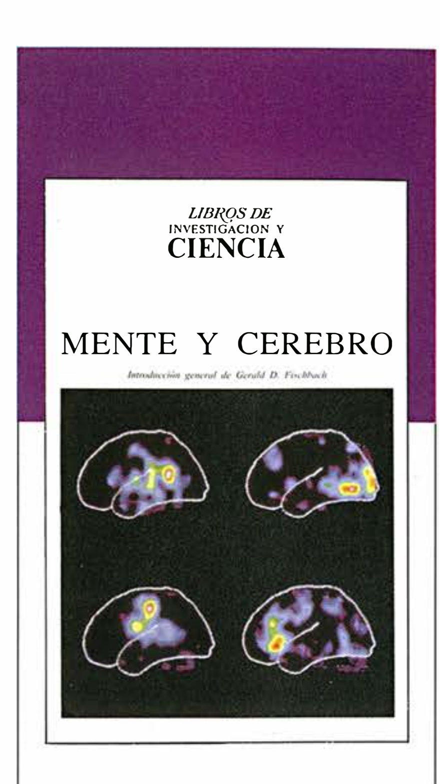
Las economías de combustible concuerdan bastante bien con las estimaciones de la Agencia para la Protección Ambiental para este vehículo: 14,5 y 19,6 kilómetros por litro, respectivamente para los ciclos urbano y por autopista. Si se tienen en cuenta las pérdidas de energía en los frenos durante la marcha por ciudad, que rebaja aproximadamente en un diez por ciento la economía de combustible, la concordancia es aún mejor.

Nuestros resultados podrían ser engañosamente buenos. No sólo habrá en ellos errores experimentales, sino que además en los ciclos de marcha intervienen diversas velocidades, lo cual complica los cálculos de las resistencias del aire y del motor. Sin embargo, los métodos que le presentamos deben permitirle determinar qué se hace con la mayor parte de la energía cuando su vehículo está en marcha.

El estudio que ofrecemos brinda algunas sugerencias para mejorar la economía de combustible. Como el rozamiento total que debe vencer un motor depende del número de revoluciones del cigüeñal, cambiar las velocidades hacia arriba para llegar cuanto antes a la velocidad de crucero y mantener ésta con el cambio en alta reducirá el rozamiento en el motor. Si quitamos la baca, caerá la resistencia aerodinámica y obtendremos mayor rendimiento. Unos neumáticos correctamente inflados aligeran la resistencia a la rodadura.

Convendría que el lector investigara algunas otras variables que pudieran afectar al rendimiento del combustible. Haga una prueba a rueda libre con las ventanillas abiertas o con el aire acondicionado conectado para ver qué diferencia supone ello. Podría también comprobar si la temperatura ambiente representa algún papel. Un motor rinde menos en frío que en caliente. Con algo de imaginación le será posible exprimir algún kilómetro más de cada litro de gasolina.

MARC ROSS y JOHN DeCICCO analizan aquí los métodos para incrementar el ahorro de combustible en los motores de combustión interna, de los que se ocupan en el artículo "Hacia un mayor rendimiento del automóvil" que publica este mes la revista.



Juegos matemáticos

Ian Stewart

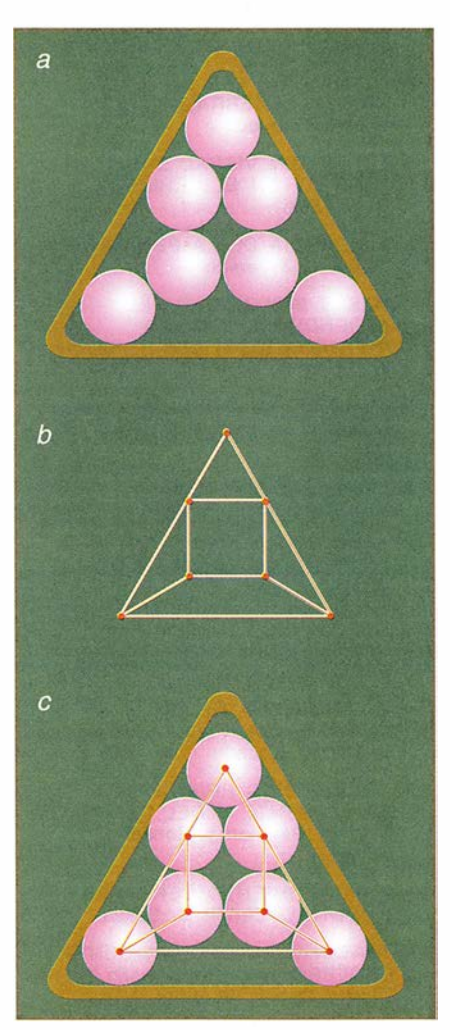
Compactación óptima de bolas en un triángulo equilátero

Al empuñó su taco de billar: tenía que introducir la bola azul en la tronera central tocándola con la bola blanca. Habría de imprimirle bastante efecto, de manera que su bola se colase entre la línea de bolas rojas y rebotase en la banda para situarse detrás de la negra...

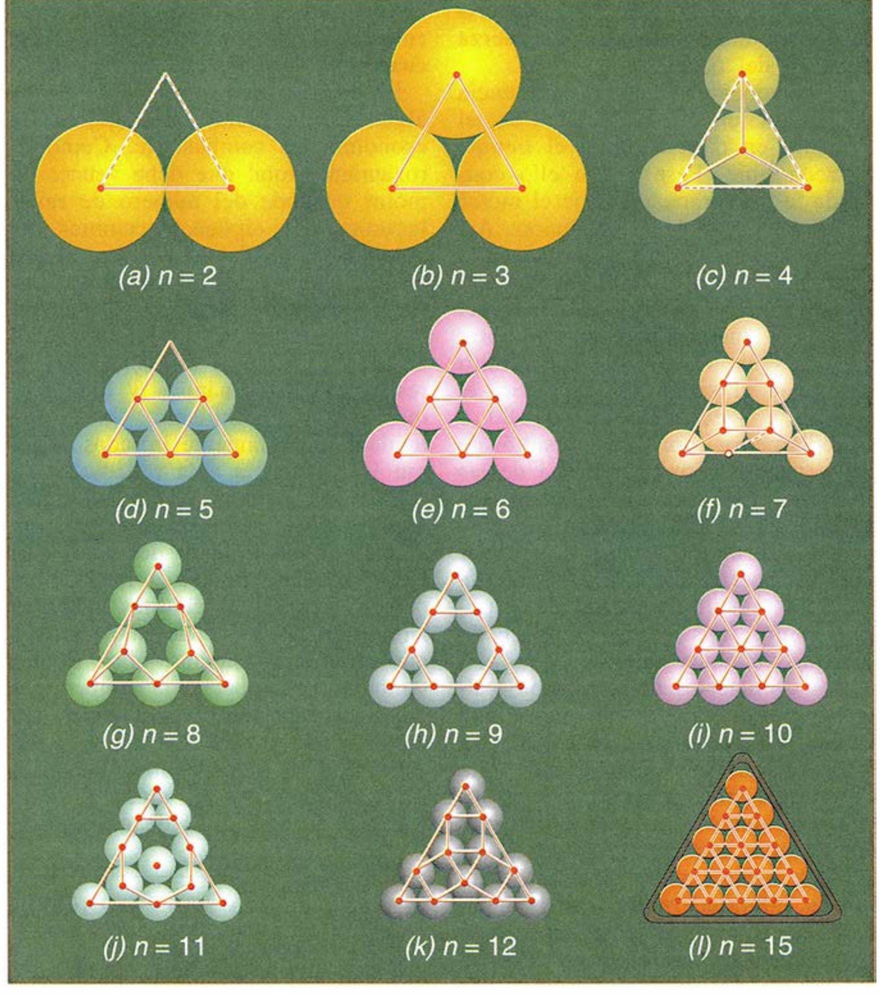
Luis M. Guasón, director de la sala, le observaba. Todo estaba preparado ya para el concurso *Europa por la banda*, retransmitido por *Chacal Plus*. Para Al Camino, era la última tacada de su última sesión de entrenamiento. ¡Lástima! La bola blanca no llegó a tocar la azul, pegó violentamente en la banda cerca de la tronera central, se elevó hacia el cielo y cayó en medio del grupo de bolas rojas. Por capricho de los sistemas caóticos, una de las bolas rojas salió volando, saltó por encima del marco de la mesa y aterrizó con violencia en el suelo.

"¡A ver si pones más cuidado, Al!", gritó Guasón. "¡Estas bolas se han fabricado especialmente para que parezcan brillantes, sin que den el reflejo de los focos! ¡Y no tenemos más que ésas!"

El árbitro comenzó a preparar la mesa para el comienzo de la partida. Colocó un triángulo equilátero en un extremo de la mesa y se puso a situar bolas en su interior. En el momento de asir una de ellas, la bola se fragmentó en mil pedazos. A Guasón le dio un ataque de nervios.



1. La compactación de bolas equivale a la colocación de puntos en el interior de un triángulo



2. Bolas de tamaño máximo que se pueden encerrar en un triángulo equilátero de lado dado, en los casos de n = 2 a n = 12, y en el caso n = 15

"¡El torneo se acaba de ir al cuerno! ¡Estas bolas son irreemplazables! Ahora nos falta una bola roja y no tenemos tiempo de sustituirla. Habrá que cancelar el campeonato. *Chacal Plus* nos llevará a los tribunales y vamos a perder hasta la camisa."

Leoni, adversario de Al Camino en la primera ronda, presenciaba la escena. Quería jugar y pensaba en resolver el problema: "¡En lugar de usar quince bolas rojas, jugaremos con catorce, y ya está!"

"¿Eso es legal?"

"Según la regla 755*b*, sección 3, en circunstancias excepcionales el árbitro está facultado para autorizar el juego aunque falten bolas. Esta regla se remonta a los tiempos en que el *snooker* se jugaba en lugares de mala nota. Las reglas no han cambiado."

"Así es", dijo el árbitro, "pero la regla 42*c*, sección 9, estipula que las bolas rojas han de estar dispuestas en el triángulo de modo que el espacio libre sea mínimo. Con una bola menos, supongo que quedarán flojas y bailando."

"Pues se hace un triángulo más pequeño", propuso Leoni.

"El problema es que no sabemos cuánto", dijo Guasón.

"Hay que tener previstas nuevas incidencias. Si yo fuera usted, haría construir una colección de triángulos capaces de alojar de 1 a 14 bolas. Por si acaso se rompieran otras."

"¡Buena idea!", exclamó Guasón. "Vamos a preguntarle a Máximo, nuestro ebanista-geómetra, de qué tamaño debemos construirlos."

"Es un problema complicado", les previno Máximo. "Vamos a ocuparnos, para empezar, de otro problema un poco diferente: la colocación de bolas lo más grandes posible dentro de un triángulo equilátero de tamaño dado, el habitualmente utilizado. Para ello habremos de situar ese mismo número de puntos en el interior de un triángulo más pequeño, de forma que la distancia mínima entre ellos sea lo mayor posible."

"Venga ya, Máximo", rezongó Guasón. "¿Cómo puede ser que algo mínimo se convierta en algo máximo?"

"Se colocan los puntos en el interior del triángulo y se miden todas las distancias entre los distintos pares de puntos; se halla la mínima distancia y luego se redisponen los puntos de manera que esta distancia mínima sea la mayor posible. El resultado es la distancia de separación maximal."

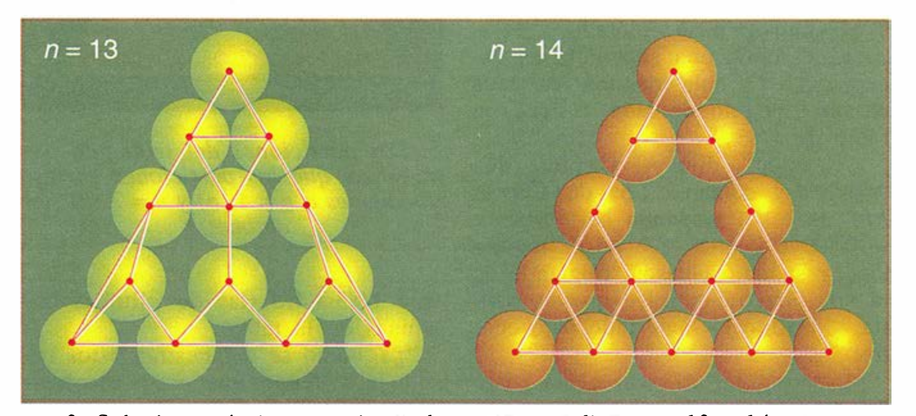
"Ya veo", concedió Guasón, "pero nosotros no tenemos que colocar puntos en el triángulo, sino bolas."

"Una cosa equivale a la otra. Visto en planta, el problema consiste en colocar discos dentro de un triángulo equilátero. Como las bolas no desbordan el marco del triángulo, sus centros no pueden salir de un triángulo equilátero más pequeño, situado en el interior del primero a distancia igual al radio de una bola. Lo único que falta hacer es situar los centros de las bolas, que corresponde a puntos, en el interior de este triángulo pequeño. Es imposible que las bolas se corten o intersequen, por lo que

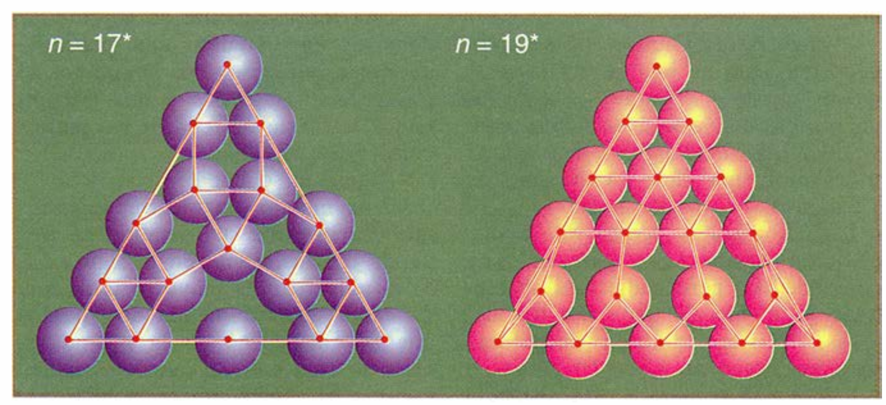
Distancia máxima de separación para *n* puntos interiores de un triángulo equilátero

n	Distancia de separación máxima		Lado del triángulo	
2	1	= 1,000000	√3 + 1	= 2,732051
3	1	= 1,000000	√3 + 1	= 2,732051
4	1/√3	= 0,577350	2√3	= 3,464102
5	1/2	= 0,500000	√3 + 2	= 3,732051
6	1/2	= 0,500000	√3 + 2	= 3,732051
7	(√3 - 1)/2	= 0,366025	2√3 + 1	= 4,464102
8	(√33 - 3)/8	= 0,343070	√3 + 1 + √33/3	= 4,646905
9	1/3	= 0,333333	√3 + 3	= 4,732051
10	1/3	= 0,333333	√3 + 3	= 4,732051
11	(3 - √6)/2	= 0,275255	√3 + 2/3(3 + √6)	= 5,365494
12	2 - √3	= 0,267949	2√3 + 2	= 5,464102
13*		0,251813		5,703252
14*	1/4	= 0,250000	√3 + 4	= 5,732051
15	1/4	= 0,250000	√3 + 4	= 5,732051
17*	(3 - √3)/6	= 0,211324	2√3 + 3	= 6,464102
19*		0,200321		6,724039

* indica valores conjeturados



3. Soluciones óptimas conjeturadas correspondientes a 13 y 14 puntos



4. Soluciones óptimas conjeturadas para 17 y 19 puntos

IAN STEWART, autor de numerosas obras técnicas y de divulgación, es profesor de matemática en la Universidad de Warwick.

los puntos han de estar separados cuando menos por una distancia igual al diámetro de una bola. Los puntos se sitúan en el interior del triángulo pequeño haciendo máxima la mínima distancia de separación" (*véase la figura 1*).

"Pero tú estás tratando de modificar el tamaño de las bolas y no la dimensión del triángulo, que era nuestro problema inicial. Las bolas que tenemos son fijas; es el triángulo lo que debe variar", dijo Guasón, inquieto.

"Puedo cambiar la escala para que la distancia mínima sea igual al diámetro de una bola", respondió Máximo, "y eso me proporcionará el tamaño exacto del triángulo. Resulta más fácil dejar fijo el triángulo y ocuparse de las distancias."

"Lo admito. E imagino que piensas empezar colocando un solo punto."

Máximo se puso colorado.

"El caso de una sola bola es excepcional. La bola máxima que cabe en un triángulo de lado 1 tiene un radio de $1/\sqrt{3}$."

"Atención", dijo Al Camino, que volvía del sótano. "Los de *Chacal Plus* se están poniendo nerviosos."

"Vuelve y diles que no se inquieten", respondió Guasón, fingiendo en la voz una tranquilidad que no sentía. "Máximo lo tiene todo bajo control."

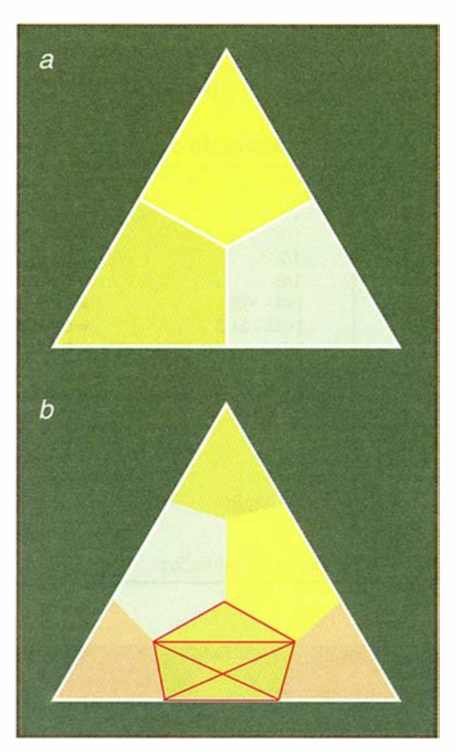
"Espero que así sea. ¿Han visto ustedes a Leoni?"

Al desapareció antes de que nadie pudiera responderle. Guasón palideció.

"Venga, señor Guasón, no se preocupe más que de una cosa por vez", quiso animarle Máximo. "Leoni es un profesional; estará a la hora convenida. Los matemáticos han resuelto el problema para un máximo de 12 puntos. En los casos de 13 y 14 existen conjeturas acerca de la disposición óptima que parecen muy convincentes, pero nadie está absolutamente seguro de que sean las mejores. Existen también conjeturas para los casos de 17 y 19 puntos."

"¿Y a qué se parece esta distancia minimal entre los puntos?", preguntó el productor.

"Los lados del triángulo tienen longitud 1, y la distancia máxima de separación está dada por la tabla que se adjunta en recuadro. Se deduce fácilmente el tamaño del triángulo necesario para alojar bolas de diámetro fijo. De hecho, si el radio de las bolas se toma igual a 1, y llamamos d a la distancia mínima de separación correspondiente a n bolas, un poco de trigonometría basta para demostrar que el lado del triángulo vale $1/\sqrt{3} + 1/d$ (las dos últimas columnas de la tabla)."



5. Las particiones del triángulo demuestran que las particiones correspondientes a n = 4 (a) y n = 7 (b) son optimales

"¿Y cómo se demuestran estos resultados? Tengo que estar absolutamente seguro de que son correctos; de lo contrario el *Chacal Plus* se negará a aflojar la guita."

"Una forma sencilla de cerciorarse consiste en inventar una partición adecuada del triángulo. Dividimos el triángulo en regiones y nos preguntamos la forma de repartir los puntos entre estas regiones."

"¡Dame un ejemplo!"

"Con mucho gusto. Supongamos que descompone su triángulo en tres partes iguales, como en la figura 5*a*. Si el número n es mayor o igual que 4, habrá cuando menos dos puntos que se encuentren en la misma región, lo cual entraña que la distancia mínima de separación es, a lo sumo, el diámetro de esta región, o sea, $1/\sqrt{3}$. Por otra parte, para alcanzar esta distancia uno de los puntos ha de hallarse en el centro del triángulo y el otro en un vértice. Asimismo, los dos puntos restantes han de encontrarse también en los vértices, y se obtiene la solución *c* de la figura 2. En el caso $n = 7$ se utiliza la partición de la figura 5*b*; por otra parte, 7 es el primer número primo para el que existe más de una solución. Ahora, para doce puntos..."

"Vale, vale", cortó Guasón. "Máximo, ya me has convencido de que sabes de qué hablas. Haznos, por favor, esos triángulos."

Máximo se puso a cortar los lados de un triángulo adecuado para dos bolas. Rezongó entre dientes. "Pero en el caso de trece o catorce bolas, corro el riesgo de trabajar para nada, porque los resultados no son más que conjeturas..."

"Demonios. Ahora tenemos catorce justas, y un accidente más nos dejaría con trece. ¡Qué ironías tiene la suerte!"

"Sí, claro. Y también es irónico desde otro punto de vista..."

"¿Qué quieres decir?"

"El valor conjeturado para $n = 14$ es el mismo que para $n = 15$; basta suprimir una bola en la disposición triangular habitual. Para catorce como para quince bolas se utiliza el triángulo normal."

El rostro de Guasón mostró signos de congestión aguda. "¿Me estás diciendo que si no se nos rompen más bolas y el valor supuesto para catorce es correcto..."

"Pues lo que corre más prisa es no hacer nada, señor Guasón."

Guasón echó un vistazo a su reloj. "Más vale que sea así, porque sólo faltan 30 segundos para que comience el torneo." Se levantó bruscamente. Máximo hundió el último clavo.

"Misión cumplida. El triángulo para dos bolas está terminado", anunció, ufano. Guasón se paró y volvió rápidamente sobre sus pasos. "¡Dámelo, dámelo enseguida! No tenemos tiempo para que prepares los triángulos de tres a trece bolas, ¿verdad? ¡No creo que puedas hacerlos todos en menos de 22 segundos!"

"No."

"Entonces, si Leoni o quien sea rompe otra bola más, y nos deja con sólo 13... tendrá usted que vérselas con los de *Chacal*!"

"Voy a romper once bolas más y utilizaremos esto."

Guasón agitó triunfante el triángulo de Máximo. "Con dos bolas nada más el espectáculo no será gran cosa, pero respetaremos el reglamento."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON PARTITION OF AN EQUILATERAL TRIANGLE. R. L.Graham, en *Canadian Journal of Mathematics*, vol. 19, págs. 394-409, 1967.

UNSOLVED PROBLEMS IN GEOMETRY. H. T. Croft, K. J. Falconer y R. K. Guy. Springer-Verlag, Berlín 1991.

DENSEST PACKINGS OF CONGRUENT CIRCLES IN AN EQUILATERAL TRIANGLE. Hans Melissen, en *American Mathematical Monthly*, vol.100, págs. 916-925, 1993.

Creaciones informáticas

Jean-Paul Delahaye

¿Tiene recompensa el altruismo?

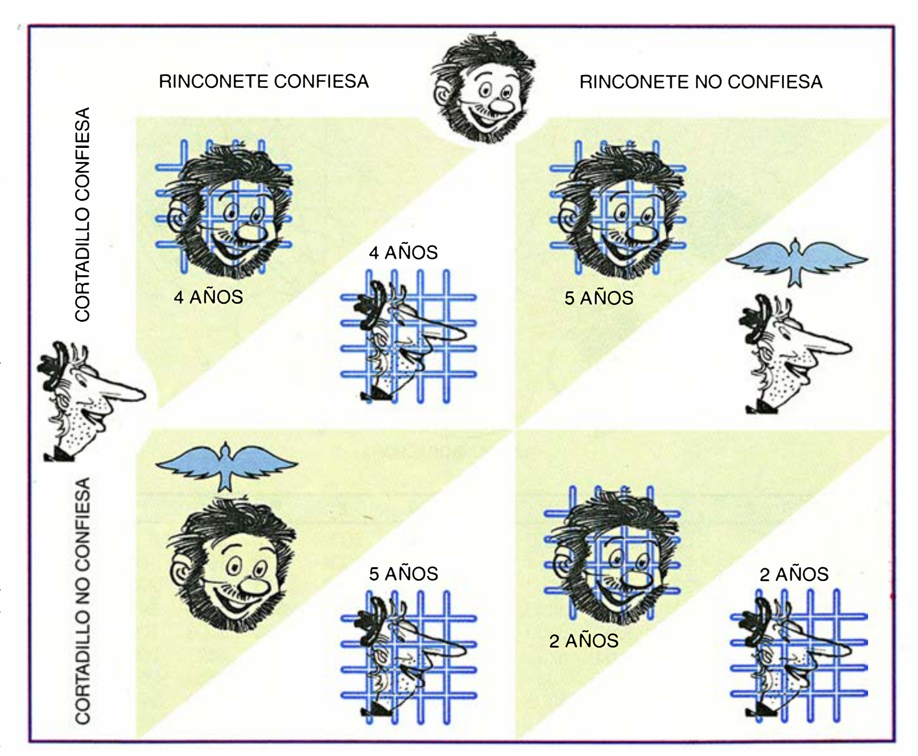
El inquilino del piso contiguo se dedica a poner discos de rock duro a partir de las diez de la noche; nosotros, en represalia, replicamos con ópera wagneriana. Al día siguiente nuestro vecino insiste en el rock y nos obliga al contraataque operístico. ¡Cuánto añoramos al antiguo inquilino, a quien jamás se le oía y al que procurábamos no causar molestia alguna! Empezamos a preguntarnos si el mejor remedio para apaciguar a nuestro molesto prójimo no consistirá en dejar nosotros de poner música.

Tal vez le complazca saber que se encuentra usted en la situación conocida en teoría de juegos por "dilema del preso" o "del prisionero" y que las simulaciones computarizadas llevadas a cabo hace ya algunos años por Robert Axelrod, de la Universidad de Ann Arbor en Michigan, han conducido a resultados no poco sorprendentes. Philippe Mathieu, del Laboratorio de Informática Fundamental de Lille, y quien escribe, hemos realizado algunos experimentos que completan y confirman las conclusiones de Axelrod.

Recordemos la historia (¿imaginaria?) que motivó el apelativo "dilema del prisionero". Dos sospechosos armados, detenidos a las puertas de un banco, han sido recluidos preventivamente en sendas celdas. Los detenidos no pueden comunicarse y han de optar entre confesar que se disponían a asaltar el banco o guardar silencio. El fiscal les hace saber que, si uno de ellos confiesa y el otro no, dejará al "canario" en libertad sin cargos por su confesión y el otro resultará condenado a cinco años de prisión; si ninguno de los dos confiesa, ambos habrán de sufrir dos años de prisión por tenencia ilícita de armas; por fin, si ambos confiesan, es seguro que ambos habrán de pasar cuatro años de vacaciones... en el caldero.

Cada uno de los implicados puede razonar como sigue. "Primera hipótesis: mi compinche confiesa. En tal caso, también a mí me conviene confesar, pues entonces me caerían cuatro años de cárcel en lugar de cinco. Segunda hipótesis: mi colega mantiene la boca cerrada. También en ese caso me convendría confesar, pues quedaría en libertad. Conclusión: en los dos casos resulta preferible confesar; voy a hacerlo, pues." Sin embargo, si cada "presunto" confiesa, ambos se verán condenados a cuatro años de cárcel, pudiendo, de haber cerrado el pico, salir bastante bien librados con sólo dos años por tenencia ilícita de armas. Esta paradoja es irresoluble: a pesar de que el interés común consiste en ser solidarios y no abrir la boca, a cada cual, por separado, le conviene traicionar a su compinche.

La situación expuesta ilustra bien el problema de la cooperación y es análogo al que cada noche nos enquista con nuestro vecino. Describámosla de forma un poco más abstracta: dos entidades pueden optar entre la cooperación (denotada c) o la traición (denotada t). Si una de las partes opta por la traición y la otra por la cooperación (partida [t, c]), la que ha traicionado logra una ganancia de T unidades, mientras que la cooperante —que ha caído en la trampa— obtiene una ganancia (negativa, por lo general) de D unidades. Cuando las dos entidades cooperan (partida [c, c]), cada una de ellas obtiene C en recompensa de su asociación, mientras que cuando ambas traicionan (partida [t, t]) cada una recibe P por dejarse engañar y haber caído en la trampa tendida por la otra. En el caso del dilema de los presos los coeficientes son negativos (por ser años de libertad perdidos) y se tiene $T = 0$ (pago de la traición), $D = -5$ (penalización por haberse dejado defraudar), $C = -2$ (recompensa de la mutua cooperación), $P = -4$



1. Dilema del prisionero. Cada uno de los dos inculpados puede, ora confesar, ora no confesar. Vemos en la figura las penas correspondientes a cada combinación



1. BONACHONA:
COOPERO SIEMPRE



2. MALVADA:
TRAICIONO SIEMPRE



3. LUNATICA:
TRAICIONO Y COOPERO AL AZAR, CON LA MISMA PROBABILIDAD



4. TOMA Y DACA:
COOPERO EN LA PRIMERA PARTIDA; A PARTIR DE ENTONCES COPIO LA JUGADA DE MI ADVERSARIO EN LA PARTIDA PRECEDENTE



5. RENCOROSA:
EMPIEZO COOPERANDO, PERO EN CUANTO MI ADVERSARIO ME TRAICIONE, LE TRAICIONARE SIEMPRE



6. PERIODICA-MALVADA:
JUEGO TRAICIONAR-TRAICIONAR-COOPERAR; TRAICIONAR-TRAICIONAR-COOPERAR; TRAICIONAR-TRAICIONAR-COOPERAR; ETC.



7. PERIODICA-BONACHONA:
JUEGO COOPERAR-COOPERAR-TRAICIONAR; COOPERAR-COOPERAR-TRAICIONAR; COOPERAR-COOPERAR-TRAICIONAR; ETC.



8. MAYORIA-FLOJA:
JUEGO LO QUE EL ADVERSARIO HAYA JUGADO MAS VECES, EN LA PRIMERA PARTIDA, O EN CASO DE IGUALDAD, COOPERO



9. DESCONFIADA:
TRAICIONO EN LA PRIMERA PARTIDA, Y DESPUES, LO MISMO QUE EL ADVERSARIO EN LA PARTIDA PRECEDENTE



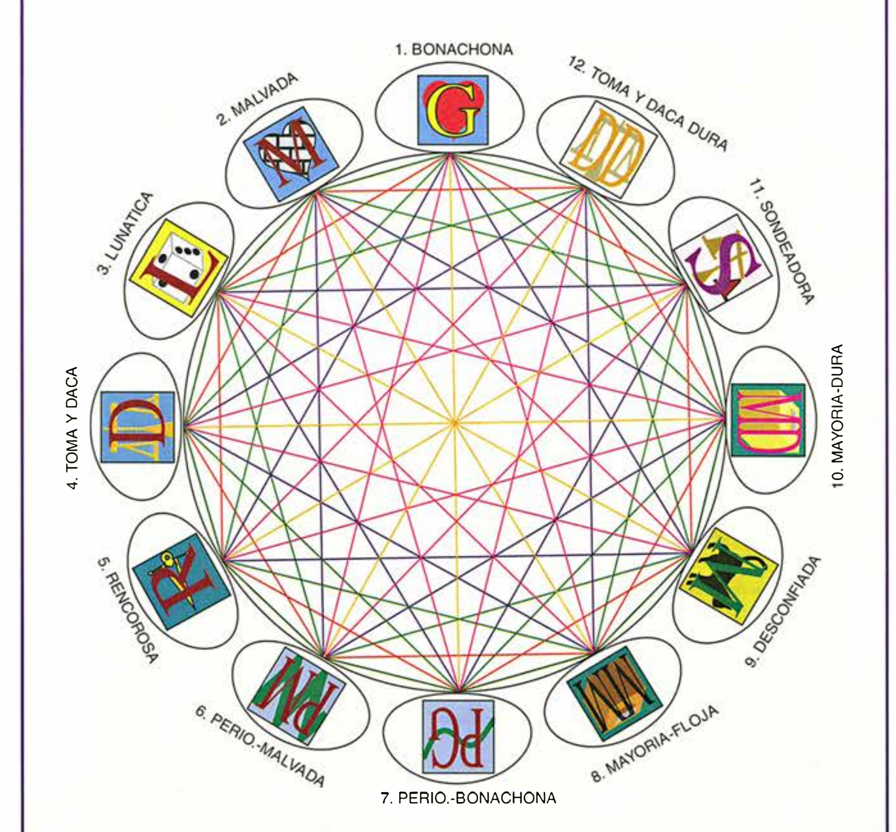
10. MAYORIA-DURA:
JUEGO LO QUE EL ADVERSARIO HAYA JUGADO MAS VECES, EN LA PRIMERA PARTIDA, O EN CASO DE IGUALDAD, TRAICIONO



11. SONDEADORA:
EN LAS 3 PRIMERAS PARTIDAS JUEGO TRAICIONAR-COOPERAR-COOPERAR. SI EN LAS PARTIDAS 2ª Y 3ª EL ADVERSARIO COOPERA, TRAICIONARE SIEMPRE; DE NO SER ASI, ME ATENDRE A TOMA Y DACA



12. TOMA Y DACA DURA:
COOPERO, SALVO CUANDO MI ADVERSARIO HA TRAICIONADO EN ALGUNA DE LAS DOS PARTIDAS PRECEDENTES



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3000	0	1506	3000	3000	999	2001	3000	2997	2997	6	3000
2	5000	1000	2998	1004	1004	2332	3668	1004	1000	1000	1008	1004
3	3994	500	2234	2229	495	1657	2839	2387	2246	2305	2036	1412
4	3000	999	2227	3000	3000	1998	2667	3000	2500	2500	2999	3000
5	3000	999	3039	3000	3000	2331	3663	3000	1003	1003	1007	3000
6	4334	667	2510	2003	671	1666	3335	671	1999	667	2006	671
7	3666	333	1984	2667	343	1665	2334	3666	2664	2663	2664	1671
8	3000	999	2197	3000	3000	2331	2001	3000	2500	2500	2999	3000
9	3002	1000	2249	2500	1003	1999	2669	2500	1000	1000	3000	1003
10	3002	1000	2222	2500	1003	2332	2003	2500	1000	1000	2501	1003
11	4669	998	2348	2999	1002	1996	2669	2999	2995	2496	1004	1005
12	3000	999	2632	3000	3000	2331	3331	3000	1003	1003	1010	3000

(precio a pagar por haber caído en la trampa tendida por el fiscal.)

En el caso del conflicto con su vecino, valoremos en 5 el placer de escuchar música tranquilamente después de las diez de la noche sin que el vecino haga otro tanto; valoremos en 0 la molestia de soportar sin réplica una música que nos disgusta; demos 3 puntos a la satisfacción de una velada de tranquilidad sin música y 1, por fin, al "gozo" de oír nuestra música favorita mezclada con otra que nos fastidia. Los coeficientes son $T = 5$, $D = 0$, $C = 3$, $P = 1$, esto es, los mismos que en el dilema de los presos, salvo por la constante aditiva 5. En el caso general, para que surja el dilema es necesario que $T > C > P > D$ y que $(T + D)/2b < C$. La última desigualdad tiene la función de impedir que a las entidades participantes les resulte preferible ir abusando de la otra y dejándose abusar por turnos (serie de partidas [*c*, *t*] [*t*, *c*] [*c*, *t*] [*t*, *c*]...) que cooperar regularmente (serie de partidas [*c*, *c*] [*c*, *c*] [*c*, *c*] [*c*, *c*]...).

Es improbable que el dilema se les presente a unos mismos detenidos más de una vez; nosotros, en cambio, tendremos al vecino al otro lado de la pared todas las noches: nos encontramos en la situación del "dilema iterado del prisionero". Existen muchísimos ejemplos más. ¿Deben dos países fronterizos imponer elevados aranceles aduaneros sobre los productos que importan del país vecino? Cuando dos empresas tienen un mismo mercado, ¿les conviene hacerse una competencia salvaje o ponerse de acuerdo para compartirlo? ¿Deben dos especies biológicas que moren en un mismo territorio cohabitar pacíficamente, o disputarse los recursos disponibles? La generalidad del dilema emana de que éste se presenta aunque las dos entidades desempeñen roles no simétricos y aun

2. Existen infinitas estrategias posibles; la figura muestra una docena. La tabla inferior representa los resultados de 1000 confrontaciones de una contra una. Por ejemplo, la confrontación de MALVADA contra TOMA Y DACA genera la secuencia de partidas [t, c] [t, t] [t, t] [t, t] [t, t]..., lo que supone un tanteo de 5 + 999 × 1 = 1004 puntos para MALVADA y de 0 + 999 × 1 = 999 puntos para TOMA Y DACA. En una partida [t, c] quien traiciona gana cinco puntos, mientras quien coopera (y ha dejado que abusen de él) gana 0 puntos; en una partida [c, c] cada jugador gana tres puntos; por último, en una partida [t, t] cada jugador se anota un punto

cuando las recompensas de una no sean comparables con las de la otra. Lo único que importa es que se cumplan las relaciones indicadas.

El juego se torna interesante en realidad al iterar la situación descrita en el dilema, pues no se trata ya de optar meramente entre traición o cooperación a un solo envite; el problema estriba ahora en determinar la estrategia que debemos adoptar en función del comportamiento pasado de la otra entidad participante. Veamos algunas estrategias:

BONACHONA: "Coopero siempre, sea lo que sea lo que haya hecho el otro en las partidas precedentes."

MALVADA: "Traiciono siempre."

LUNATICA: "En cada partida, decido al azar si cooperar o traicionar lanzando una moneda a cara o cruz."

TOMA Y DACA: "Coopero en la primera partida; a partir de ese momento, haré lo mismo que haya hecho el otro en la partida precedente; si me traiciona en la ronda n-ésima, yo se lo haré en la $(n + 1)$-ésima; si coopera en la partida n-ésima, también yo en la partida $(n + 1)$-ésima."

RENCOROSA: "Cooperaré mientras el otro no deje de hacerlo; pero en cuanto me traicione, yo le traicionaré en todas las jugadas siguientes."

Veamos de precisar un poco más las reglas del juego y aclaremos de paso en qué puede consistir una estrategia. Supondremos, ante todo, que los protagonistas no pueden establecer acuerdos; la única información que cada participante posee acerca del otro es su comportamiento en el pasado. Las decisiones de ambos protagonistas en la partida número n se efectúan simultáneamente. Una estrategia consiste, pues, en una regla que permite determinar, dependiendo del pasado y posiblemente, también, en función de lanzamientos al azar, si en la etapa n se debe cooperar o traicionar. En la primera etapa, la estrategia debe especificar cómo proceder si se carece por completo de información sobre la entidad rival.

No se puede renunciar a jugar una partida; tampoco se sabe de antemano cuántos serán los envites. Si no se impusieran estas premisas caeríamos en otra situación encuadrada en la llamada "paradoja de la sorpresa" o "paradoja del ahorcado".

En efecto, si supiéramos que el número de partidas a jugar es exactamente diez, según un razonamiento precedente, al llegar a la décima y última, tanto a mí como a mi adversario nos convendría traicionar. Nuestro interés individual resulta manifiesto; por tanto, es como si no hubiera partida número 10. Pero entonces, la partida número 9 pasaría a ser la "auténtica" última partida, por lo que deberíamos traicionar en dicha partida 9, etcétera."

Tanteos en una confrontación generalizada con combates de 1000 partidas

Clasificación y tanteos en una confrontación generalizada de las 12 estrategias

TOMA Y DACA (30.890), MAYORIA-DEBIL (30.527), RENCOROSA (28.045), SONDEADORA (27.507), PERIODICA-BONACHONA (27.320), TOMA Y DACA DURA (27.309), BONACHONA (25.506), LUNATICA (24.336), DESCONFIADA (22.925), MAYORIA-DURA (22.066), MALVADA (22.022), PERIODICA-MALVADA (21.210)

Clasificación y tanteos en una confrontación generalizada cuando se elimina RENCOROSA

TOMA Y DACA (27.897), MAYORIA-FLOJA (27.429), PERIODICA-BONACHONA (27.002), SONDEADORA (26.571), TOMA Y DACA DURA (24.293), LUNATICA (24.186), BONACHONA (22.491), DESCONFIADA (21.924), MALVADA (21.004), MAYORIA-DURA (20.923), PERIODICA-MALVADA (20.505)

Clasificación y tanteos en una confrontación generalizada cuando se elimina PERIODICA-BONACHONA

MAYORIA-FLOJA (28.883), TOMA Y DACA (28.324), SONDEADORA (25.113), RENCOROSA (24.352), TOMA Y DACA DURA (23.999), BONACHONA (23.507), MAYORIA-DURA (20.513), DESCONFIADA (20.253), LUNATICA (19.020), MALVADA (18.385), PERIODICA-MALVADA (17.881).

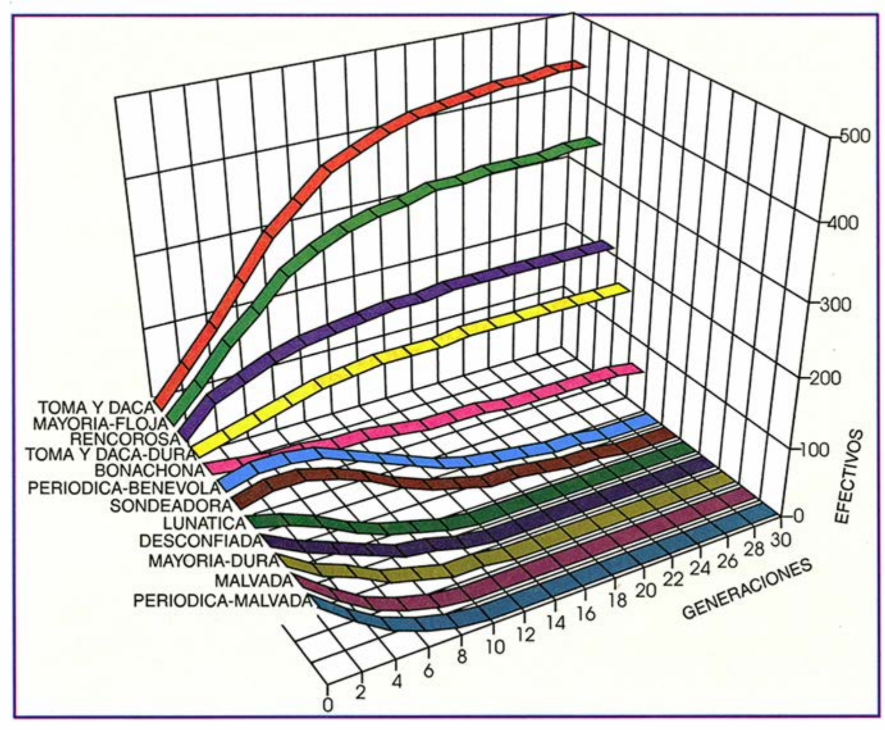
3. Los tanteos acumulados de la figura 2 muestran que TOMA Y DACA llega en cabeza en una confrontación generalizada de las 12 estrategias. Si se modifica el ambiente (por ejemplo, eliminando una de las estrategias, lo que puede hacerse de 12 formas) y se organiza una confrontación generalizada entre las 11 estrategias restantes, TOMA Y DACA queda en cabeza 10 veces de cada 12. Las dos veces en que TOMA Y DACA no es primera, tal puesto lo ocupa MAYORIA FLOJA

Una vez producida una confrontación, podemos medir el tanteo de los dos adversarios sumando los resultados logrados por cada uno. En el caso de una serie de 100 envites con los coeficientes $T = 5$, $D = 0$, $C = 3$, $P = 1$, la ganancia máxima es 5000, y la mínima, de 0 puntos. Tales son, en efecto, las puntuaciones que obtienen respectivamente las estrategias MALVADA y BONACHONA al enfrentarse una con otra, pues su confrontación engendra la serie [t, c], [t, c], [t, c]... que le proporciona $T = 5$ a la primera estrategia y $D = 0$ a la segunda en cada partida. Al enfrentar entre sí dos estrategias BONACHONAS éstas consiguen 3000 puntos, mientras que en el enfrentamiento de dos MALVADAS cada una tiene que contentarse con 1000 puntos.

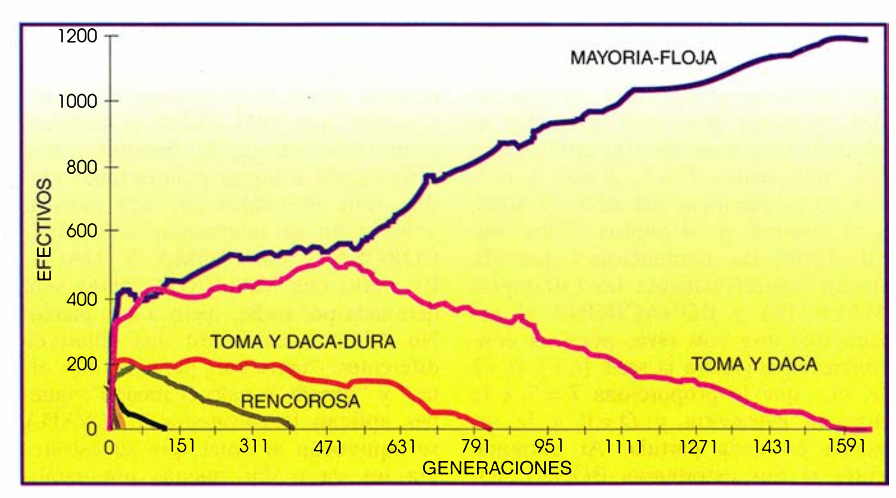
¿Existirá una estrategia óptima? Depende de qué se entienda por estrategia óptima. Si por óptima entendemos la estrategia que nunca, en ninguna confrontación, obtiene menor puntuación que su adversaria, entonces la respuesta es afirmativa: la estrategia MALVADA es óptima. Sin embargo, la optimalidad en este sentido no es muy interesante; pues, a menos que MALVADA se enfrente a muchas estrategias ingenuas, nos arriesgamos a lograr puntuaciones medias muy reducidas en cada partida, sobre todo al interactuar con RENCOROSA y con TOMA Y DACA. Es cierto que MALVADA jamás será derrotada por nadie, ¡pero a qué precio! No debemos confundir dos objetivos diferentes: "conseguir puntuaciones altas" y "ganarle a todo el mundo"; quienes aplican la estrategia MALVADA se equivocan al creer que su estrategia les va a dar buenas puntuaciones: aunque nunca pierden frente a nadie, sus puntuaciones son bajas.

Ahora bien, si por óptima entendemos la estrategia que consigue la mejor puntuación posible frente a cualquier otra, la respuesta es negativa:

no puede haber estrategia óptima en tal sentido. En efecto, supongamos que existiera: tendría necesariamente que traicionar en el primer envite, pues si hubiera de enfrentarse a MALVADA y cooperase en la primera jugada ya no podría recuperar nunca la pérdida de la primera ronda; por otra parte, si la hipotética estrategia óptima traicionase en el primer envite, al enfrentarse a RENCOROSA no consigue el mejor resultado posible, pues logra en el primer golpe menor puntuación que BONACHONA y —como antes— esta diferencia inicial es irrecuperable, ya que RENCOROSA, por definición, no perdona jamás.



4. La robustez de la estrategia TOMA Y DACA queda de manifiesto en la simulación de un proceso de evolución de una población de 1200 estrategias. Se toman inicialmente 100 estrategias de cada uno de los 12 tipos descritos en la figura 1 y se efectúa una confrontación generalizada entre las 1200 estrategias. Se calcula el tanteo de cada estrategia, a partir del cual se determinan los nuevos efectivos que corresponderán a cada uno de los 12 tipos de estrategias, haciendo siempre que el total permanezca igual a 1200. Los efectivos van evolucionando de generación en generación hasta el momento en que sólo quedan estrategias que cooperan sin cesar entre ellas: la cooperación se ha instaurado. A partir de ese instante, todas las estrategias obtienen la misma puntuación y se estabilizan los efectivos. En el momento de la estabilización la cabeza está ocupada por TOMA Y DACA



5. Se utiliza el mismo principio que en la figura 4, pero en cada generación se eliminan 50 estrategias seleccionadas al azar entre las 1200, para simular el efecto de accidentes fortuitos. Las malvadas desaparecen bastante pronto; pero, en cuanto sólo quedan estrategias bonachonas, la evolución de efectos es aleatoria, produciéndose un fenómeno de deriva. La gráfica representa una deriva de este tipo que ha concluido en la victoria de MAYORIA-FLOJA

En dos palabras: una estrategia puede resultar idónea frente a algunas e inadecuada para enfrentarse a ciertas otras. Se trata de algo inevitable, al no poder de antemano saber con quién hemos de tratar.

Apreciaremos mejor aún la dificultad de establecer una jerarquía absoluta en las estrategias al observar que existen ternas de estrategias donde la 1 vence a la 2, la 2 a la 3 y la 3 a la 1. Veamos un ejemplo de tal terna intransitiva:

PERIODICA-MALVADA: "Juego periódicamente: traición, traición, cooperación, traición, traición, cooperación, etc."

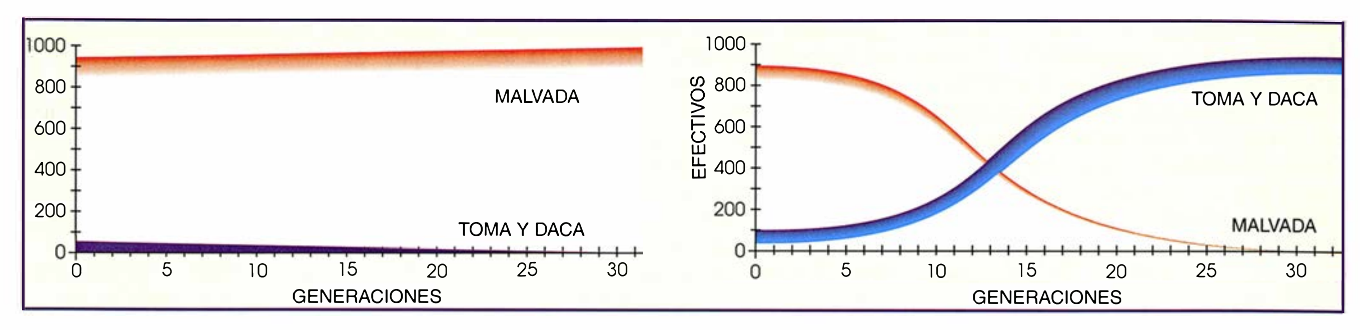
PERIODICA-BONACHONA: "Juego periódicamente: cooperación, cooperación, traición, cooperación, cooperación, traición, etc."

MAYORIA-FLOJA: "Voy contando el número de cooperaciones y de traiciones del otro; juego lo que el otro haya elegido mayor número de veces; en la primera jugada, puesto que hay empate de traiciones y cooperaciones, opto por cooperar."

Sacando partido de la misma idea se pueden construir conjuntos de este género con N estrategias. De igual manera, existen jerarquías infinitas de estrategias $S1$, $S2$, $S3$, ..., Sn, en las que $S2$ vence a $S1$, $S3$ vence a $S2$, y así sucesivamente. He aquí un ejemplo:

ESTRATEGIA Sn: "Juego periódicamente: traicionar $(2n-1)$ veces; después, cooperar una vez; volver a traicionar $(2n-1)$ veces, cooperar una vez, etc."

Aun cuando no existe una estrategia óptima en sentido absoluto, salta a la vista que no todas las estrategias son igual de efectivas. Algunas son demasiado bonachonas; otras parecen ser demasiado susceptibles; otras, demasiado represalientes, etc. Puesto que en las confrontaciones por parejas no resulta posible discernir las estrategias eficaces de las poco idóneas, organicemos una confrontación generalizada: tomemos un conjunto de estrategias y hagamos interactuar a cada una de ellas con todas las demás. Mediremos los tanteos acumulados de cada una y las clasificaremos en función de sus tanteos acumulados. Evidentemente, la simulación habrá de realizarse por ordenador. Hemos indicado en las figuras 2 y 3 los resultados de tales con-



6. Se considera una población de 1000 estrategias, compuesta de 50 unidades TOMA Y DACA y de 950 de MALVADA, que hacemos evolucionar como en la figura 4 (aunque ahora las confrontaciones son de 10 partidas). Las TOMA Y DACA no alcanzan un número suficiente para invadir a las MALVADAS. Si inicialmente colocamos 100 TOMA Y DACA y 900 MALVADA, son las MALVADAS las que sufren la invasión

frontaciones, obtenidos mediante un programa de Mathieu redactado en lenguaje C.

El resultado depende del conjunto de estrategias que se hayan enfrentado entre sí; una estrategia eficaz en un cierto "ambiente" puede resultar poco atinada en otro medio distinto. Hemos indicado en la figura 3 la clasificación obtenida por las estrategias al hacer variar el ambiente (vale decir, el conjunto de las estrategias adversarias).

La estrategia TOMA Y DACA no gana siempre. Sin embargo, sí queda sistemáticamente bien situada. ¿Será por casualidad? No; de hecho, en ello reside el resultado fundamental descubierto por Axelrod. Organizó éste una serie de torneos en los que solicitó, a distintos científicos de disciplinas diversas, propuestas de estrategias, que luego hizo enfrentarse en un campeonato por el sistema de liga, todas contra todas. Se percató entonces de las extraordinarias cualidades de TOMA Y DACA, estrategia propuesta por Anatol Rapoport, de la Universidad de Toronto.

Los resultados de Axelrod constituyen una demostración de la superioridad de TOMA Y DACA sobre cualquier otra estrategia en el caso de confrontaciones generalizadas. Se trata de un resultado notable y bastante inesperado, pues hace ver que las estrategias más elaboradas nada pueden contra la capacidad de reacción y la simplicidad de TOMA Y DACA. Demuestra, asimismo, que en un juego de esta clase no es buena idea comportarse malévolamente, contra lo que sugiere el dilema simple del prisionero.

El éxito de TOMA Y DACA confirma lo que ya hemos mencionado sobre las estrategias que no pierden jamás. Para ser exactos, en las confrontaciones con otras estrategias, TOMA Y DACA no es jamás la vencedora. En el mejor de los casos consigue una puntuación igual a la del adversario, pero en ninguna circunstancia puede superarle. TOMA Y DACA obliga al otro a cooperar, porque toda diferencia de tanteo en su confrontación tiene por pago una reducción de las puntuaciones de ambas. Enfrentados a TOMA Y DACA tenemos la opción de cooperar (lo que es ventajoso para ambos) o de tratar de abusar de tal estrategia, lo que supone pérdidas para los dos. Otra propiedad de TOMA Y DACA es que no podremos sacarle más de 5 puntos de diferencia, sean cuales fueren la duración de la confrontación y la estrategia que utilicemos.

De ello se infiere: (*a*) es preferible ser generoso que mezquino; (*b*) es necesario poseer capacidad de represalia; la falta de reacción ante las traiciones del otro sólo servirá para animarle a la contumacia en ellas; (*c*) es preciso perdonar pronto; si retiramos definitivamente la confianza al adversario desde el momento en que nos defrauda (caso de RENCOROSA) resulta imposible la instauración de toda cooperación ulterior; (*d*) de nada sirve recurrir a astucias o añagazas; la claridad de comportamiento es la más susceptible de conducir a cooperación prolongada y provechosa.

¿Qué sucede cuando se modifica la duración de las confrontaciones o cuando se modifican los coeficientes $T = 5$, $C = 3$, $D = 0$, $P = 1$? Los ensayos que hemos realizado en colaboración con Mathieu han revelado que los resultados variaban bastante poco. TOMA Y DACA no siempre queda en cabeza; ahora bien, si las confrontaciones duran y los coeficientes respetan las desigualdades especificadas, TOMA Y DACA consigue siempre buena clasificación; además, todas las estrategias que encabezan la clasificación poseen cualidades análogas a las de TOMA Y DACA: son bienintencionadas, poseen capacidad de represalia y son sencillas e indulgentes.

Examinemos otra situación, en la que hacemos interactuar múltiples ejemplares de una misma estrategia y donde este número de ejemplares evoluciona en función del resultado de las confrontaciones. De esta forma evaluamos también el interés del proselitismo. El principio de este nuevo tipo de campeonato es el siguiente: inicialmente se da cierto número de estrategias, dotando a cada una de ellas de un número de efectivos (100 individuos, por ejemplo). Se pone en marcha una confrontación generalizada, en la que cada estrategia consigue cierto tanteo. Esas puntuaciones sirven para definir los nuevos efectivos de las estrategias en competencia, desembocando en lo que llamaríamos una nueva generación. Se desarrolla entonces un nuevo enfrentamiento generalizado, cuyos resultados se utilizan para definir la tercera generación, y así sucesivamente.

Para que una estrategia venza en tal campeonato, no basta que sea eficaz frente a sus competidoras; debe también demostrar su eficacia frente a las nuevas composiciones que la evolución de los efectivos hace aparecer generación tras generación. En particular, si una estrategia obtiene puntuaciones bajas al enfrentarse consigo misma, difícil será que llegue a imponerse.

La figura 4 describe lo que sucede con nuestras 12 estrategias.

La estrategia TOMA Y DACA sigue todavía saliendo muy bien parada. No llega a eliminar a todas sus competidoras por una razón que se nos alcanza fácilmente: al ir cayendo las estrategias malvadas, las únicas supervivientes son estrategias bonachonas que colaboran indefectiblemente unas con otras. Ya no se produce evolución alguna, pues las estrategias son indiscernibles y logran en cada confrontación puntuaciones idénticas. En una simulación más realista es preciso hacer intervenir cierto elemento de azar, por ejemplo, eliminando por sorteo, tras

cada generación, 50 individuos que fallecen (¡por accidente!). Vemos ahora aparecer derivados y variantes: ciertas estrategias poco afortunadas se extinguen (por haber sufrido más bajas accidentales que las demás); otras, por el contrario, ven incrementados sus efectivos, aprovechando los huecos que dejan las desafortunadas. Un poco de cálculo de probabilidades hace ver, por otra parte, que, al introducir un elemento aleatorio de este tipo, transcurrido cierto tiempo tan sólo permanece en liza una única estrategia (que no siempre es TOMA Y DACA).

El estudio matemático de la forma en que una estrategia invade a otra en un proceso de evolución proporciona los resultados siguientes, que verifican y aclaran las simulaciones precedentes.

–La estrategia MALVADA no puede ser invadida por una estrategia aislada (que pudiera surgir por mutación en una población compuesta exclusivamente por MALVADAS). Se dice por ello que la estrategia MALVADA es colectivamente estable.

–En contrapartida, un bloque integrado por muchas estrategias TOMA Y DACA que apareciera bruscamente es capaz de invadir una población formada exclusivamente por MALVADAS.

–Una estrategia contundente (es decir, que toma rápidas represalias si es traicionada) es siempre colectivamente estable; en particular, TOMA Y DACA es colectivamente estable.

–Una estrategia bonachona (que coopera a la primera ocasión) ha de reaccionar ante la primera traición de la otra para ser colectivamente estable.

–Si una estrategia es bonachona y colectivamente estable, no puede ser invadida, ni siquiera por un bloque.

Los resultados enunciados ponen de manifiesto una disimetría entre la estrategia MALVADA y las estrategias del tipo de TOMA Y DACA (contundente y bonachona): unas y otras son colectivamente estables, pero únicamente las del tipo TOMA Y DACA son capaces de rechazar la invasión por bloques de enemigos. Se demuestra que, para los coeficientes elegidos y confrontaciones de diez partidas, si apareciera súbitamente más de 1/17 de TOMA Y DACA en una población compuesta exclusivamente por MALVADA, tal población se dejaría invadir. Por el contrario, si el bloque de TOMA Y DACA fuese más pequeño resultaría destruido. En el caso de confrontaciones a 1000 partidas, la fracción 1/17 se torna 1/1997.

Axelrod recabó la ayuda de W. D. Hamilton, biólogo de la Universidad de Ann Arbor, para aplicar a la teoría de la evolución los análisis deducidos de sus simulaciones informáticas y de sus análisis matemáticos. Los casos de cooperación entre individuos o entre especies plantean problemas delicados en la teoría de la evolución y salta a la vista que los mecanismos preparados por Axelrod contribuyen a comprender lo que sucede, o pudo haber sucedido, a partir de la constitución de asociaciones de cooperación estable observadas en el mundo biológico.

La idea de que la cooperación puede instalarse duraderamente en un ambiente de egoísmo resulta cierta, aun cuando las entidades intervinientes carezcan de inteligencia. En el caso de los microorganismos, las estrategias pueden muy bien hallarse programadas por reflejo y no ser sino consecuencia de mecanismos físicos y químicos elementales. Para que la cooperación se instaure basta que exista continuidad en las interacciones: las partidas han de ser largas; las mismas entidades han de permanecer cara a cara durante un número suficiente de envites.

La condición de continuidad en las confrontaciones puede venir dada por restricciones físicas o topográficas; en particular, es frecuente observar fenómenos cooperativos entre los individuos de especies territoriales, susceptibles, por ello mismo, de confrontaciones prolongadas.

Por otra parte, para que las entidades móviles puedan desarrollar partidas prolongadas del dilema iterado del prisionero es imprescindible que posean buenas facultades de identificación. De poseerlas, pueden desarrollar simultáneamente numerosas confrontaciones, que desembocan en actos de cooperación o de intentos de explotación según los individuos con que se encuentren, lo que permite que los fenómenos evolutivos se establezcan rápidamente, con la consiguiente eliminación de las entidades no cooperantes y la proliferación de las demás.

Esta última observación permite afirmar, además, que la complejidad y la inteligencia favorecen la cooperación; constituyen, pues, ventajas en el proceso de selección que se desarrolla en el mundo biológico, contrariamente a la idea de que la aparición de la inteligencia y la complejificación de los seres vivos constituyen hechos fortuitos. TOMA Y DACA es una estrategia sencilla cuya aplicación no requiere inteligencia si las entidades interactúan una con una. Por otra parte, un ser que haya de interactuar con muchos otros ha de ser capaz de identificar con quién está tratando para poder desarrollar simultáneamente las partidas del dilema iterado del prisionero, lo cual exige un elevado desarrollo de todas las capacidades cognitivas, o dicho de otro modo, supone dicho ser complejidad e inteligencia.

Axelrod ha imaginado una variante del juego del dilema iterado, en la que las entidades en interacción pueden aplicarse unas a otras diferentes estrategias según una marca o identificador peculiar de cada una. Imaginemos, por ejemplo, que las marcas sean dos, *A* y *B*, y que las *A* apliquen la estrategia MALVADA al interactuar con las *B* y la estrategia TOMA Y DACA al hacerlo con las *A*, mientras que, recíprocamente, las *B* se ajustan a MALVADA al interactuar con las *A* y a TOMA Y DACA al hacerlo con las *B*. Se producirá entonces el fenómeno siguiente: las *A* cooperarán entre sí y las *B* cooperarán entre sí; cada vez que se encuentren dos de distinta clase, se destrozarán mutuamente. Todavía peor: si una de las *A* decidiera atenerse a la estrategia TOMA Y DACA con todo el mundo, lo pagaría muy caro, porque las *B*, por negarse a la cooperación, la explotarían.

Un universo como el descrito, constituido por los dos grupos *A* y *B*, sería, pues, escenario de un conflicto permanente e imposible de concluir. Ninguno de los bandos es más malvado que el otro, pero cada interacción de los A con los B refuerza en unos y otros el prejuicio de que "sólo son buenos los de mi bando y malvados los del contrario". Este tipo de situación, ¿no recuerda lo que ocurre en el mundo?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE FURTHER EVOLUTION OF COOPERATION. R. Axelrod y D. Dion en *Science*, volumen 242, págs. 1385-1390, 9 de diciembre de 1988.

THE SELFISH GENE. R. Dawkins. Oxford University Press, 1976. Segunda edición: Richard R. Awkins, 1989. Traducción española EL GEN EGOÍSTA, Biblioteca Científica Salvat, Barcelona, 1985.

DONNANT-DONNANT: THÉORIE DU COMPORTEMENT COOPÉRATIF. R. Axelrod. Editions Odile Jacob, París, 1992.

EXPÉRIENCES SUR LE DILEMME ITÉRÉ DES PRISONNIERS. J.-P. Delahaye y P. Mathieu. Relación de investigación del laboratorio de informática fundamental de Lille, n.o 233, junio 1992.

LES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES. J. Holland en *Pour la Science*, págs. 44-51, n.º 179, septiembre 1992.

Libros

Luis Alonso

Los maestros

Y sus obras

STYLES OF SCIENTIFIC THINKING IN THE EUROPEAN TRADITION, por Alistair C. Crombie; Ducworth; Londres, 1994.

THE EYE OF HEAVEN. PTOLEMY, COPERNICUS, KEPLER, por Owen Gingerich. The American Institute of Physics; Nueva York, 1993.

AFTER NEWTON: ESSAYS ON NATURAL PHILOSOPHY, por P. M. Harman. Variorum; Aldershot, 1993.

VESTIGIA MATHEMATICA. Dirigido por M. Folkerts y J. P. Hogendijk. Rodopi; Amsterdam, 1993.

AMPHORA. Dirigido por Sergei S. Demidov, Menso Folkerts, David E. Rowe y Christoph J. Scriba. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1992.

No rige en todos los investigadores la ley de merma de capacidad creadora con los años. Alistair Cameron Crombie, zoólogo de formación, experto en Platón, autor del citadísimo *Augustin to Galileo* y mentor de historiadores de la ciencia, dejó para la hora nona su mejor obra, una extensa "summa", a la que pertenecen estos *Styles of scientific thinking in the European tradition*, de subtítulo *The history of argument and explanation especially in the mathematical and biomedical sciences and arts.*

Crombie reflexiona sobre su mester. La historia de la ciencia es, a la postre, una antropología, una historia del hombre, de su comprensión de la naturaleza y de sí mismo. Con ese horizonte, desgrana la observación del mundo, su interpretación racional y su transformación a lo largo de los siglos. Penetrando simpatéticamente en las mentes de nuestros antepasados, habremos de abordar las cuestiones que les apremiaban y sumergirnos en los tipos de respuesta que les sería satisfactoria. Los propios experimentos adquieren distintos significados e intenciones en contextos diferentes.

Separado para siempre del pasado, el historiador puede reconstruirlo sólo a partir de lo que ve y conoce. El movimiento científico europeo comportó diversos estilos de investigación, demostración y explicación, distintos según los campos de estudio, según las concepciones generales de la naturaleza y según los supuestos sobre la validez de sus métodos teóricos y experimentales. Cada estilo aprehende regularidades en la experiencia de la naturaleza que se convierten en su objeto de estudio, define las cuestiones que hay que plantearse y determina las soluciones aceptables. De la interacción entre estilo y campo de estudio brotan los métodos apropiados de inquisición y los tipos de argumentación y prueba. Dentro de cada estilo, materias distintas se unifican bajo una misma óptica.

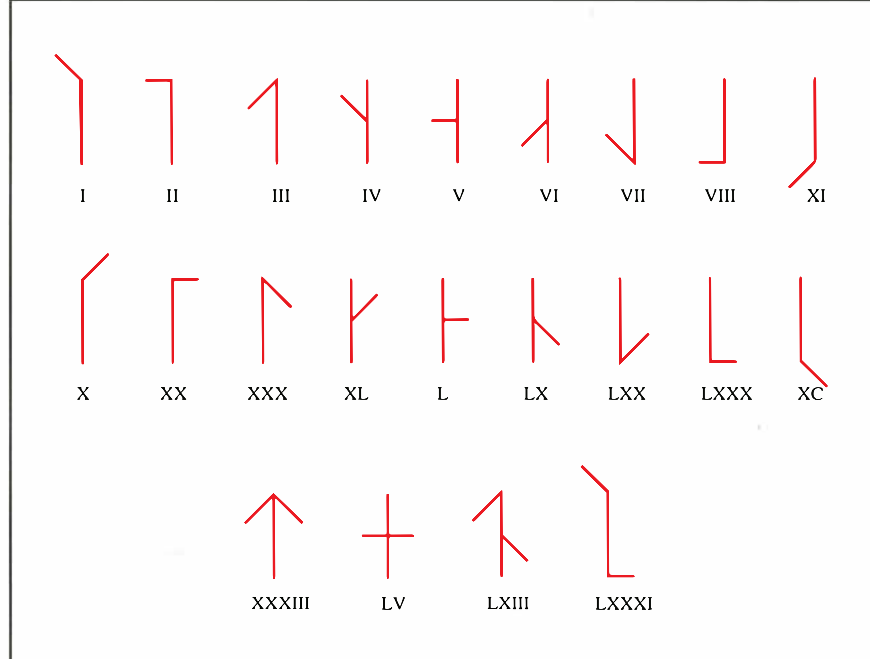
Crombie establece seis estilos. Tres se desarrollaron en campos de estudio atentos a las regularidades individuales y tres se centran en campos de regularidades poblacionales. El *primer estilo*, enunciativo de postulados, se ejemplifica en el recurso al poder demostrativo de la geometría y la aritmética para dar cuenta de las regularidades elementales de la naturaleza. Representantes arquetípicos de este estilo son los matemáticos y médicos griegos. El *segundo estilo* hace bandera de la argumentación, para controlar los postulados enunciativos y para explorar el mundo mediante la observación y la medición. Lógicos medievales y arquitectos renacentistas son sus principales promotores.

El *tercer estilo* introduce modelos hipotéticos para sacar a la luz propiedades desconocidas de un fenómeno natural a partir de sus propiedades conocidas. Imitan la naturaleza Tomás de Aquino, Copérnico y Francis Bacon; modelizan el sentido de la visión Alhacén, Kepler y Descartes; el sentido de la audición, Thomas Willis; crean analogías biológicas Robert Boyle y Marcello Malpighi. Con el *cuarto estilo*, la taxonomía impone orden en la variedad por comparación y diferenciación. Destacan en esta tendencia, que se resuelve en los sistemas naturales, Teofrasto, Alberto Magno, Andrea Cesalpino y Linneo.

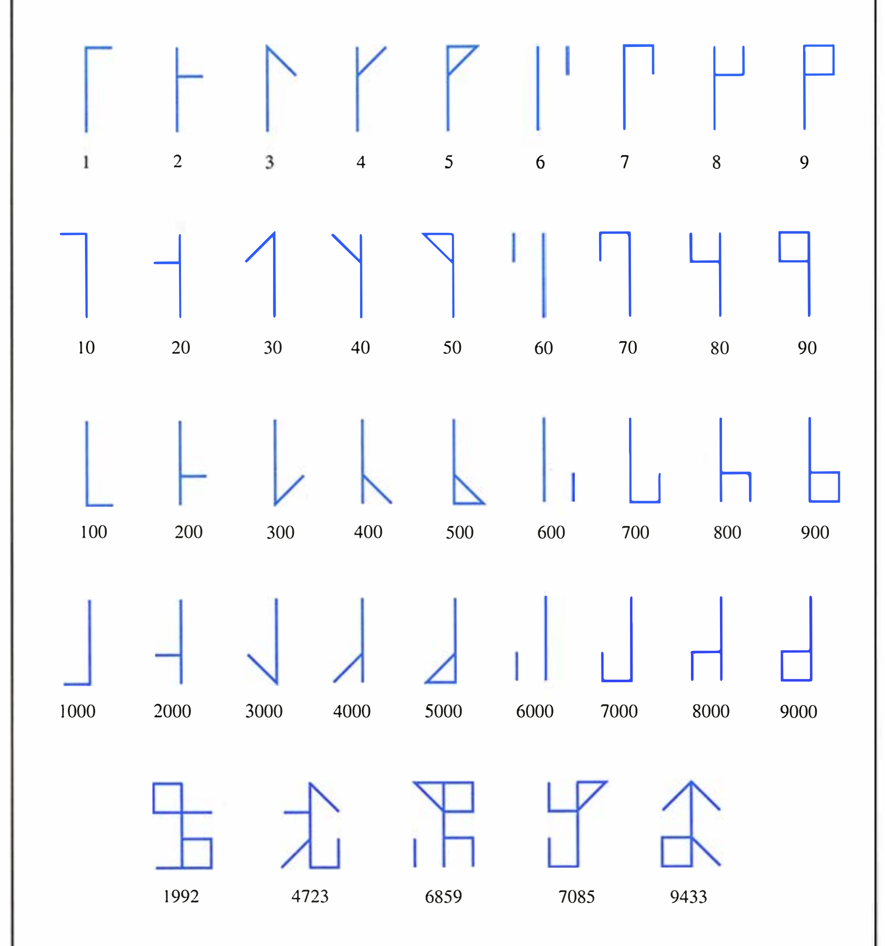
En el *quinto estilo* la herramienta teórica es el análisis estadístico. Emerge de la necesidad de una lógica precisa ante situaciones de esperanza contingente y suerte incierta, junto con el descubrimiento explícito de regularidades estadísticas en las poblaciones. Esta incertidumbre se estabiliza en un cálculo de probabilidades que abarca, bajo un mismo enfoque, teoría de la decisión, juegos de azar, comercio, ley y selección natural. Distingue al *estilo sexto* su hincapié en la inferencia histórica. Tiene por campo central el diagnóstico de las fuentes y causas, ya se trate de lenguajes o de organismos vivos. Los enciclopedistas, Kant y Darwin serían sobresalientes cultivadores de esta escuela. Cada estilo define las cuestiones de su campo central y las soluciones consideradas pertinentes. Un estilo de interrogación, con su lenguaje y su método, puede excluir otros, pero también pueden ser complementarios.

Owen Gingerich llegó a la historia desde la astrofísica. Casi por un juego. Un ejercicio de computación con una IBM 7094 que manipulaba en segundos un problema iterativo de cálculo sobre la órbita de Marte que, a Kepler, le ocupó dos años. "The Computer versus Kepler" apareció en 1964. Desde entonces han salido de su pluma artículos magistrales sobre la astronomía de la revolución científica, de los que ha seleccionado venticinco para *The Eye of Heaven, Ptolemy, Copernicus, Kepler*.

Ptolomeo escribió su obra principal, el *Almagesto* de los árabes, en Alejandría en torno al 150 d. C. Se trata de una síntesis de astronomía teórica y manual práctico para el cálculo de las efemérides, donde muesta cómo convertir datos observacionales en parámetros numéricos para sus modelos planetarios, y con éstos construir tablas a partir de las cuales calcular las posiciones del Sol, la Luna y los planetas, con los eclipses. Se propone calcular la posición de los planetas con respecto a la eclíptica, esto es, la trayectoria del Sol a través del zodíaco. (La eclíptica es la línea a lo largo de la cual ocurren los eclipses lunares, de donde recibe el nombre.) Y determinar su longitud y latitud. Recurre con tal fin a mecanismos geométricos. Arranca de un viejo problema, planteado ya por Platón: explicar las idas



Las cifras de John de Basingstoke, de comienzos del siglo XIII.



Cifras de un tratado de aritmética escrito probablemente por Jean Fusoris, de principios del siglo XV.

y venidas de los planetas. ¿Cómo justificar el movimiento retrógrado? De partida, tenía a su disposición una obra de Apolonio de Pérgamo, quien había considerado el problema de un círculo secundario moviéndose sobre otro círculo mayor —un epiciclo sobre un deferente. Se ocupa luego de la longitud del año tropical y de las estaciones.

El *Commentariolus*, primera incursión de Copérnico en astronomía, critica el geocentrismo al uso y dibuja una configuración heliocéntrica muy distinta. La obrita, que se abre con una queja contra el ecuante, enumera siete supuestos, de los que Gingerich resalta el tercero (todas las esferas giran en torno al Sol como si éste se hallara en el centro de todas ellas) y el séptimo (lo que parecen ser movimientos directos y retrógados no procede de los planetas, sino de la Tierra). Ambas premisas forman la base de la nueva cosmología y uno de sus principales razonamientos.

Copérnico desata una polémica revolucionaria cuando, en el *De revolutionibus orbium coelestium,* sentencia: "En el centro de todo descansa el Sol... como en un trono real, gobernando la familia de estrellas que rueda a su alrededor." Distingue un movimiento de la Tierra en torno a su eje y otro en torno al Sol; además, su eje cambia de dirección lentamente produciendo un fenómeno de precesión-trepidación.

Lo mismo que Ptolomeo y Copérnico, Kepler creía en la armonía del universo. Había comenzado su carrera en la Universidad de Tübingen, donde tuvo por maestro a un copernicano: Michael Maestlin. Esa familiaridad con el heliocentrismo le llevó a plantearse tres cuestiones: ¿Por qué distan los intervalos aceptados unos planetas y otros? ¿Por qué se mueven con la regularidad que muestran? ¿Por qué hay sólo seis planetas? A la hora de ilustrar las grandes conjunciones de Júpiter y Saturno, trazó una serie de cuasi-triángulos cuyas líneas comienzan a formar un círculo interior, de tamaño la mitad de círculo eclíptico externo. La proporción entre los círculos despertó la atención de Kepler lo mismo que las proporciones entre las órbitas de Saturno y Júpiter. Quedaría para Isaac Newton borrar las últimas huellas de la física aristotélica y colocar el sistema heliocéntrico sobre unos sólidos fundamentos.

Justamente el primer tramo de ese camino se recorre en los artículos de P. M. Harman agavillados bajo el título *After Newton: Essays on Natural Philosophy*. Cubren la física de siglo

y medio, de 1700 a 1850, vale decir, desde la noción newtoniana de materia pasiva hasta la concepción de naturaleza como sistema regulado por fuerzas internas. Clasifica en dos grupos los ensayos reunidos; los que tienen que ver con la dimensión filosófica de la teoría sobre la materia en cuyo marco se originarán los conceptos de energía y de campo, y los escritos sobre las críticas de Leibniz y Kant a la filosofía natural de Newton.

Frente a la pasividad concedida a la materia en la física del XVII, personifica en Joseph Priestley y James Hutton el nuevo rumbo del XVIII que supone a ésta constituida por potencias atractivas y repulsivas. Adscribir una potencia a un objeto material es afirmar lo que puede o no puede hacer, en virtud de su naturaleza intrínseca. Locke será el filósofo que se esconde tras la idea de potencia como algo sustantivo de los objetos, en tanto que Descartes, Hobbes y Boyle yacían detrás de la concepción pasiva.

La filosofía natural del XVIII se anclaba en una epistemología empírica, que negaba las categorías tradicionales de cualidades primarias (masa, por ejemplo) y secundarias (color). Priestley sostenía que la extensión, las potencias atractivas y las repulsivas constituían la esencia de la materia, y no partículas sólidas. Llegaríase así a la idea de materia integrada sólo por fuerzas que se difundían a través del espacio, lo que en parte iba a conformar el concepto de campo físico en Faraday.

Newton basó su primera ley del movimiento en los *Principia* sobre una relación entre fuerza (acción externa que genera el cambio de movimiento) e inercia (propiedad fundamental de la materia en virtud de la cual los cuerpos oponen resistencia a los cambios en su estado de reposo o de movimiento lineal uniforme). Al desarrollar la mecánica, introduce dos conceptos, el de *fuerza impresa* y el de *inercia*, para explicar el movimiento de los cuerpos. Por *fuerza impresa* designa las causas que generan cambio de movimiento o de reposo; por *inercia*, la potencia interna en virtud de la cual un cuerpo tiende a perseverar en su estado. Y explicaba el movimiento en virtud de ese dualismo de fuerzas.

Leibniz, Euler y Kant discreparon del pensamiento newtoniano. Los debates sobre los conceptos de fuerza e inercia se convirtieron, en efecto, en elemento definidor de la física dieciochesca. Leibniz se proponía refutar el marco conceptual de los *Principia* y crear su propia ciencia, la dinámica. Euler se aprestó a elaborar una mecánica esencialmente newtoniana pero puliendo el significado de la *vis inertiae*. Kant se esforzó por justificar la inteligibilidad de las leyes newtonianas de la física mediante la reconstrucción de sus fundamentos metafísicos.

Suelen abrigarse en los libros homenaje colaboraciones de circunstancias y de irregular nivel. No ocurre así en *Vestigia Mathematica* ni en *Amphora*. La razón y contenido del primero se avanzan en el subtítulo, *Studies in medieval and early modern mathematics in honour of H. L. L. Busard*. A este septuagenario holandés le debemos el conocimiento de la matemática medieval a través de sus ediciones del Euclides latino. A su imagen, el volumen rescata valiosos textos inéditos: el *Algebra* de Abul Kamil, la *Rithmachia* de Werinher von Tegernsee y la *Geometria speculativa* atribuida a Roger Bacon. O apostilla cuestiones euclídeo-medievales.

España constituye una referencia constante. Djebbar expone la matemática desarrollada en la península durante el siglo XI. Deja de lado la astronomía y la trigonometría, para ceñirse a la geometría de Abu Amir Yusuf Ibn Ahmad ("al-Mutaman") y de Ibn Sayyid. Fue aquél el tercer pretendiente de la dinastía de los Banu Hud, familia que reinó de 1039 a 1118 en Zaragoza. Al-Mutaman subió al trono en 1081 y reinó hasta su muerte en 1085. Su obra, *Kitab al-Istikmal* ("Libro de la perfección"), se difundirá por el Maghreb y Egipto. Se trataba de un vasto proyecto, inconcluso, destinado a poner a disposición de los alumnos una obra de nivel intermedio —las Mutawassitat—, que perfeccionaban los conocimientos griegos de geometría, astronomía y teoría de números.

Menos conocido es Ibn Sayyid. Sabemos que se formó en Játiva y adquirió notoriedad en Valencia, a finales del siglo XI. Empezó su labor geométrica por las *Cónicas* de Apolonio, aunque utiliza una noción de diámetro más general. Su originalidad se revela en las curvas planas de grado superior a dos. Abordó las curvas resultantes de las intersecciones de superficies cónicas y no cónicas. Por último, aplicó estas investigaciones a la generalización de los dos problemas heredados de la tradición griega y que dieron lugar, entre los siglos IX y XI, a múltiples publicaciones por los matemáticos árabes: la trisección del ángulo y la determinación de dos medias proporcionales.

Amphora. Festschrift für Hans Wussing zu seinem 65. Geburtstag honra a uno de los historiadores de la matemática que mayor influjo ha ejercido a ambos lados del telón de acero. Wussing publicó en 1969 su obra capital, *Die Genesis des abstrakten Gruppenbegrifss* ("Génesis del concepto abstracto de grupo"), donde muestra que en torno a 1870 se emancipó, de la teoría de las ecuaciones, la teoría de grupos.

En ese homenaje volvemos a encontrar colaboradores que se sumaron a la efemérides de Busard. Este mismo escribe para la ocasión sobre la *Arithmetica* de Jordanus Nemorarius. Christoph J. Scriba estudia ahora las construcciones de polígonos regulares en Nikomedes y Arquímedes; antes se había ocupado de un códice bizantino del siglo XV de teoría de números. Richard Lorch analiza el contenido e identifica la autoría del *Almagestum parvum*, un compendio de los seis primeros libros del *Almagesto* con material adicional procedente de al-Battani y otros, mientras que en el homenaje a Busard exhumaba una versión elaborada de la segunda parte del *Algebra* de Abu Kamil. En *Vestigia*, Paul Bockstaele sacaba a la luz el estado de la matemática en la primera mitad del XVII a través de tres problemas, el primero de los cuales lo tomaba de Adrianus Romanus, cuya relación con Rheticus es sujeto de su trabajo en *Amphora*; Romanus calculó los lados de polígonos regulares de 3, 4, 5, y 15 lados y de polígonos generados a partir de ellos por duplicación del número de lados, para un radio de 10^{32} partes o unidades. De la *qubba*, construcción característica de santuarios y monumentos funerarios árabes, se ocupa, por duplicado, Yvonne Dold-Samplonius. Y así varios más.

Hay en *Amphora* otros estudios sobre los orígenes de la matemática (babilónica, china) y su desarrollo. En un espléndido trabajo, David A. King aprovecha el astrolabio de Berselius para hacer un resumen de las cifras en la baja Edad Media y Renacimiento. La mayoría de los instrumentos astronómicos europeos medievales adoptan la denotación gótica. Pero el de Berselius posee una notación insólita de cifras. La variedad más elemental de cifras se remonta a comienzos del siglo XIII y nos permite representar cualquier número, hasta 99, por una sola cifra: un tronco o trazo vertical, sin valor numérico, al que se le agreguen brazos horizontales o inclinados, que son los que confieren valor numérico.

El grueso de las colaboraciones, sin embargo, se vuelca sobre distintos aspectos de la teoría de grupos y su cultivo en diferentes países.

Apuntes

La colisión entre las masas continentales de la India y Asia ejerció efectos importantes no sólo en la geología del Himalaya (el levantamiento de las montañas se debe al choque entre los continentes), sino también sobre el clima y la oceanografía. El choque provocó la desaparición de numerosas especies animales. De ahí el interés que reviste conocer la fecha exacta del episodio. Partiendo de métodos geofísicos, unos investigadores situaron el fenómeno hace 65 millones de años, en tanto que, para otros, aconteció hace sólo 38 millones de años. Recientes pruebas bioestratigráficas obtenidas en el Pakistán noroccidental se decantan por un tiempo intermedio: el choque se produjo hace 49 millones de años.

La moda de la aspirina en la prevención de la salud humana parece tener un adelantado en el mundo vegetal. Sabido es que las plantas acuden a la síntesis de compuestos defensivos para protegerse contra la enfermedad; si ésta se ha desencadenado, bloquean las células infecciosas en el punto de la agresión. Entre las sustancias que operan sistemáticamente en la línea de defensa destaca el ácido salicílico, precursor de la penicilina, y del que se valen las plantas para conjugar diversas respuestas a la enfermedad.

En abril y mayo de 1979 se produjo un brote epidémico de ántrax en la ciudad de Sverdlovsk. Las fuentes oficiales soviéticas lo atribuyeron al consumo de carne contaminada; en la OTAN se responsabilizó a las esporas liberadas fortuitamente de un centro microbiológico militar. Los datos epidemiológicos han corroborado la hipótesis occidental. El ántrax es una enfermedad aguda que afecta a herbívoros domésticos y salvajes, causada por esporas de *Bacillus anthracis*. El ántrax humano, de capacidad letal, constituye un arma de la guerra biológica.

Arañas y escorpiones se encuentran entre los invertebrados que se comunican sísmicamente entre sí, enviando vibraciones a través del suelo. Sin embargo, la comunicación sísmica pudiera darse también en el mundo vertebrado. Hay una especie de rana arbórea malasia cuyas hembras golpean el suelo con sus dedos para atraer a sus compañeros sexuales.

Las propiedades electrónicas de un sólido pueden modificarse contaminándolo con diferentes elementos. En el grafito, podemos sustituir el carbono por un nitruro de boro hexagonal, que presenta una estructura similar aunque un intervalo de banda muy superior. Se han producido ya láminas de materiales compuestos y nanotubos de grafito y carbono dopados con boro y nitrógeno. La rápida síntesis de ese material en la descarga de plasma podría estabilizar cinéticamente su formación, puesto que las fases carbono-boro-nitrógeno suelen ser inestables cuando se calientan lentamente a altas temperaturas.

Tras el descubrimiento de fenómenos de superconductividad a 30 kelvins en materiales compuestos, de fórmula $La_{2-x}Ba_xCuO_4$, se han venido multiplicando los ejemplos que superconducen a temperaturas bastante altas. Materiales que comparten todos un rasgo común: una estructura de cristal estratificada basada en un molde de perovskita y portadora de redes planares de cobre y oxígeno. Pero, ¿podría darse la superconductividad en perovskitas estratificadas sin cobre? Tras una década de investigación se ha logrado el primer caso de superconductividad en una perovskita sin cobre: Sr_2RuO_4.

La arqueología había corroborado que los aborígenes preíncas tenían patrones para medir el peso. No obstante, las numerosas balanzas de brazos descubiertas parecían indicar que los juegos de pesas medían sólo proporciones. Opinión que debe cambiar con la recuperación de cuatro lingotes de cobre, que avalan la existencia de un sistema normalizado, extendido desde Ecuador hasta la costa peruana. Los lingotes corresponden a múltiplos regulares de lo que se considera medida unidad, el *huarm*.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LONGEVIDAD DE LOS DOCUMENTOS DIGITALES, por Jeff Rothenberg

El medio digital está reemplazando al papel, lo que constituye una revolución impresionante. Pero si no se actúa de inmediato, los documentos digitales pueden perderse.

ENFERMEDADES DE ORIGEN PRIONICO, por Stanley B. Prusiner

Los priones provocan enfermedades neurodegenerativas en el ganado y el hombre. A diferencia de virus y bacterias, esos patógenos carecen de material genético: son proteínas que reconfiguran polipéptidos del huésped en copias de sí mismas.

LA TIERRA ANTES DE PANGEA, por Ian W. D. Dalziel

La Antártida no es más que un residuo congelado de California, estado norteamericano al que se hallaba uncida hace 750 millones de años. Quinientos millones de años después se formó Pangea.

NACIMIENTO Y MUERTE DE LA NOVA CYGNI V1974, por Sumner Starrfield y Steven N. Shore

Cuando esta nova brilló en 1992 llamó poderosamente la atención por su singular luminosidad. Pero se desvaneció pronto sin conocerse la razón del rápido agotamiento de su combustible nuclear.

MAQUINAS BIOMOLECULARES ELASTICAS, por Dan W. Urry

Cadenas sintéticas de aminoácidos, modeladas según las que se encuentran en el tejido conectivo, pueden transformar calor y energía en movimiento.

EL MAS ANCIANO DE LOS ANCIANOS, por Thomas T. Perls

Los nonagenarios y centenarios muestran un estado de salud vigoroso que ya quisieran para sí los que son veinte años más jóvenes. ¿Habrá que replantearse los criterios tradicionales sobre el envejecimiento?

LEY Y ORDEN EN EL UNIVERSO: EL TEOREMA DE KAM, por Barbara Burke Hubbard y John Hubbard

El teorema de KAM demuestra que, en ciertas condiciones, el movimiento de n *cuerpos que se atraen de acuerdo con las leyes de Newton es casi periódico, y que el sistema solar puede ser estable.*

EL COMPLEJO *BITHORAX* DE *DROSOPHILA MELANOGASTER*, por Fernando Casares y Ernesto Sánchez-Herrero

La elucidación de los mecanismos subyacentes en el desarrollo es uno de los principales retos de la biología. Para el estudio de dichos mecanismos, el complejo bithorax *constituye un modelo generalizable a especies muy distantes entre sí.*

